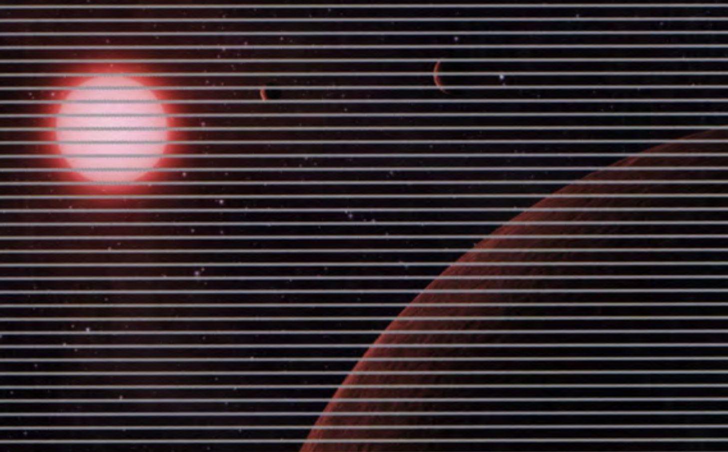


DAVID A. ROTHERY

GEZEGENLER

KÜLTÜR KİTAPLIĞI 168

DOST

David A. Rothery

Open University'nin Yeryüzü ve Çevre Bilimleri Bölümü'nde dersler veren Rothery, Mars gezegeni dahil olmak üzere çeşitli konulardaki araştırma topluluklarında yer almıştır ve an itibarıyla Merkür gezegenine gönderilecek bir X-ışını spektrometresini geliştiren ekibin başkanlığını yürütmektedir.

Rothery, David A.
Gezegenler
ISBN 978-975-298-569-8 / Türkçesi: Sinem Gül
Şubat 2017, Ankara, 173 sayfa

Kültür Kitaplığı: 168; Bilim: 12

GEZEGENLER

David A. Rothery

DOST

ISBN 978-975-298-569-8

Planets
David A. Rothery

Türkçesi, Sinem Gül

Yayına hazırlayan, Rojda Yıldırım

Teknik hazırlık, Mehmet Dirican

Erdal Akalın - Dost Kitabevi
Sertifika No: 12386
Paris Cad. No: 76/7, Kavaklıdere 06680 Ankara
Tel: (0.312) 435 93 70 • Faks: (0.312) 435 79 02
www.dostyayinevi.com • bilgi@dostyayinevi.com

Baskı, Pelin Ofset Ltd. Şti.
Sertifika No: 16157
İvedik Organize Sanayi Bölgesi, Matbaacılar Sitesi
1514. Sokak no: 28-30 Yenimahalle / Ankara
Tel: (0.312) 395 25 80-81 • Faks: (0.312) 395 25 84

İÇİNDEKİLER

Giriş

Genç İngiliz şair John Keats, Homeros'un eserlerinin yeni bir çevirisini okuma deneyimine kafa yorduğu 1816 tarihli bir sonesinde, "altından ülkeler"de "duru havayı soluma" hakkında yazar ve şöyle devam eder:

Bir yıldız gözlemcisi gibiydim o an
Görüş alanına yeni bir gezegen giren;
Ya da yiğit Cortez gibi kartal gözleriyle
Pasifik'i süzen –bütün adamları
Birbirine bakarken çılgın bir şaşkınlıkla–
Sessizce, Darien'deki bir uçurumdan.*

Keats'in yeni gezegen metaforu ya 1781'de Sir William Herschel'in Uranüs'ü görmesinden ya da ilk dört asteroidin keşfinden (1801-1807) esinlenmiştir. Daha yakın tarihli olan asteroid keşfi, belleklerde daha taze olacaktır. Günümüzde gezegen sınıfına giremeyecek kadar küçük sayılsalar da, o dönemde Keats gibi bilim insanı olmayan biri onları yeni "gezegenler" olarak görecektir.

* Çeviri: Akşit Göktürk, *Çeviri: Dillerin Dili*, Çağdaş Yayınları, İstanbul, 1986, s. 8.

Uzaklardaki, yeni keşfedilmiş bir buz topunu dijital bir görüntüdeki tek bir piksel ya da başka bir yıldızın Jüpiter büyüklüğündeki yoldaşını yıldızın konumundaki küçücük bir titreyişle ifade edilmiş halde görmek söz konusu olduğunda, yenilik hissi bir şekilde soluklaşıyor belki, ama Satürn'ü küçük bir teleskopla bile olsa kendi gözlerimle gördüğümde, hâlâ "altından ülkeler"de seyahat ediyorum.

Ancak, bana göre gerçek "Cortez deneyimi," gezgin bir uzay aracından gönderilen görüntülerde yeni bir gezegen manzarası (kimi durumlarda bulut manzarası) gözlerimin önüne serildiğinde yaşanıyor. Güneş Sistemimizin keşfi, öteki gezegenleri ve büyük uydularını kendi gezegenimiz Dünya'dakiler kadar karmaşık ve büyüleyici coğrafyalar, jeolojiler ve meteorolojilerle donanmış dünyalar olarak değerlendirebilmemizi sağlayacak bir aşamaya ulaştı. Aralarından birçoğu, sizin ve benim kuramsal olarak ziyaret edebileceğimiz yerler. Piknik yapmaya pek uygun sayılmazlar, ama en azından hoplayıp zıplayabilir, avuçlarımıza toprak doldurabilir, bir tepeye tırmanabilir ya da kayarak bir vadiye inebiliriz. Hatta bazıları, yaşamın bulunabileceği yerler.

Bu kitapta, bizim Güneş Sistemimizdeki gezegenlerin kökenleri, evrimleri ve özellikle de günümüzdeki durumları hakkında bilinenleri paylaşacağım sizlerle. Şu anda gökbilimciler resmi olarak yalnızca sekiz gezegeni tanıyorlar (ileride anlatacağım üzere, Plüton'un derecesi indirildi), ama benim gibi jeologlar söz konusu olduğunda, gezegen gibi davranacak büyüklükte başka birçok gökcismi var. Teker teker ele alınamayacak kadar çok sayıda olmalarına karşın, büyüleyici oldukları için, bunları da göz ardı etmeyeceğim.

Son olarak, başka yıldızların yörüngesinde dönen gezegenler olan "dış gezegenler"i ele alacağım. Bunların ilki 1995 gibi yakın bir tarihte keşfedilmişti ve günümüze dek yüzlercesi belgelendi. Ayrıntılı olarak göremiyoruz onları, ama bu dış gezegen sistemleriyle Güneş'in ailesi arasında bazı kıyaslamalar yapmaya yetecek kadar bilgimiz var.

I. Bölüm

GÜNEŞ SİSTEMİ

Tarihte gezegenler

Işık kirliliği ve dumanlı sis lanetlerinden önce insanlar gece göğünü günümüzdekinden daha iyi tanıyorlardı. "Sabit" yıldızların arka planında yer değiştiren "gezgin yıldızlar" oldukları için, antik kültürler gökyüzündeki gezegenleri özel sayarlardı. Beş gezegen antik çağlardan beri biliniyordu: Merkür, Venüs, Mars, Jüpiter ve Satürn – bir tek onlar, çıplak gözün dikkatini çekecek kadar parlaktılar. Güneş ve Ay da göz önündeydi elbette, ama "gezegenler" gezgin ışık noktaları olarak görünür; Güneş ve Ay ise disk halindedir ve bu nedenle onlara genellikle farklı bakılırdı. İnsanlığın varlığının büyük bölümü boyunca Dünya yaratılışın merkezi ve gökyüzündeki nesnelerle ilişkisiz olarak tasavvur edilir, dolayısıyla, gezegen olarak düşünülmezdi.

Dünya'nın Güneş'in etrafında dönen bir kaya topu olduğunu, gezegenlerin de aynı şeyi yaptıklarını ve Dünya'nın aralarından yalnızca biri olduğunu kabul edecek en-

telektüel atılımlara daha çok zaman vardı. Yavaş ilerleyen bir süreçti bu ve birçok sahte şafağı oldu. İÖ 5. yüzyılda antik çağ Yunan filozofu Anaksagoras, Ay'ın Güneş'in ışığını yansıtan küresel bir gökcismi olduğunu doğru biçimde tahmin etti ve inançlarından ötürü sürgüne gönderildi. Sonraki yüzyıllarda çeşitli Çinli gökbilimciler benzer fikirler geliştirdiler, ama bir küre olarak Ay fikri halk bilincine muhtemelen 17. yüzyılda teleskop aracılığıyla görüldüğü öğrenilene dek yerleşmedi.

Gezegenlere gelince, genellikle, Dünya'nın etrafında dönen ışık noktaları sayılıyorlardı; ta ki, hareket merkezinin Güneş olduğu "güneş merkezli" görüş kabul edilene dek. Dünya'nın Güneş'in etrafında döndüğü yönündeki en eski yazılı önermelere İÖ 9. yüzyıldan kalma Hint metinlerinde rastlanır, ama bunlara ve başta Helen ve İslam bilgeleri, sonralarıysa 1543'te Nikolas Kopernik olmak üzere sonraki bağımsız önermelere rağmen, bu düşünce 18. yüzyıla dek itibar görmemiştir. Teleskopuyla Ay'daki dağları, Venüs'ün evrelerini ve Jüpiter'in yörüngesinde dönen dört küçük ayı görmüş olan Galileo Galilei'nin 1633'ten 1642'deki ölümüne dek ev hapsinde tutulmasının nedeni, biraz da, güneş merkezli kuramı savunmasıydı.

17. yüzyılın başından itibaren teleskobun kullanılması, yıldızlar ışık noktacıkları olarak kalırken gezegenlerin küçük ama ayırt edilebilir diskler olduğunu ortaya çıkararak yıldızlardan temelde farklı olduklarının anlaşılmasını sağladı ve bizimkiyle kıyaslanabilir dünyalar olarak görülmelerinin yolunu açtı. Ayrıca, yıldızların gezegenlerden çok daha büyük olduklarını artık biliyoruz, ama (Güneş hariç) bizden o kadar uzaktalar ki, en gelişmiş modern teleskop-

lar bile ancak birkaç örnekte yüzey ayrıntılarını gösterebiliyor (fotoğraflarda parlak yıldızlar soluk yıldızlardan daha büyük görünür, ama yalnızca optik bir etkidir bu – bu nedenle, parlaklık bulanıklaştırılır).

Kepler'in gezegensel hareket yasaları

Johannes Kepler'in (Dünya dahil) gezegenlerin Güneş'in etrafında tam daireden çok elips şeklinde yollarda (yörüngelerde) hareket ettiklerini (1609'da) fark etmesi ve Isaac Newton'ın kütleçekimi hakkındaki, bu hareketi açıklayan (1687 tarihli) içgörüsü sayesinde, gezegenler insan anlayışındaki haklı yerlerini almışlardır. Bundan sonra, Dünya'ya göre uzaklıkları ve boyutları çıkarsanmaya başlayabilmiştir.

Elipsi bir "oval" olarak düşünebilirsiniz. Matematiksel açıdan, iki noktanın (elipsin odakları) etrafından, her odaktan eğrideki herhangi bir noktaya uzaklıkların toplamının aynı olacağı şekilde çizilmiş kapalı bir eğri olarak tanımlanır. Daire, iki odağın dairenin merkezinde çakıştıkları, özel türde bir elipstir. Odak noktaları birbirlerinden ne kadar uzaktaysa, elips o kadar uzun ya da "dış merkezli" olur. Kepler gezegenlerin eliptik yörüngeler izlediklerini ve her bir elipsin bir odağında Güneş'in olduğunu (öteki odak boştu) çıkarsadı. Yörüngede Güneş'e en yakın noktaya enberi ve en uzak noktaya da enöte denir. Gezegenlerin yörüngeleri fazlasıyla dış merkezli değildir ve yatay kesit olarak çizilmiş halde gördüğünüzde daireye çok benzerler. Örneğin, Mars enötedeyken Güneş'ten uzaklığının

enberideki durumuna kıyasla fazlalığı % 21'den düşüktür ve Dünya için de bu fark yalnızca % 4'tür.

Kepler üç gezegensel hareket yasasıyla haklı bir ün kazanmıştır. Kepler'in Birinci Yasası, her gezegenin, odaklardan birinde Güneş'in yer aldığı eliptik bir yörüngede hareket ettiğinden ibarettir. İkinci Yasa, bir gezegenin hızının yörüngesi içerisinde nasıl değişkenlik gösterdiğini tanımlar: gezegen Güneş'e ne kadar yakınsa, (sonradan Newton'ın kütleçekimi kuramında açıklanan nedenlerden ötürü) o kadar hızlı hareket eder; öyle ki, gezegeni Güneş'e bağlayacak hayali bir çizgi, eşit zamanda eşit bir alanı tarar. Kepler'in Üçüncü Yasası, gezegenin yörünge süresini (Güneş'in etrafında tam bir turu tamamlama süresini) Güneş'ten ortalama uzaklığıyla ilişkilendirir: yörünge süresinin küpü, ortalama uzaklığın karesiyle orantılıdır. Gezegenin Güneş'e ortalama uzaklığı, yörünge elipsinin uzun ekseninin (yarı-büyük eksen) uzunluğunun yarısına ya da, tercihinize göre, enberiyle enöte arasındaki düz çizgi uzaklığın yarısına eşittir.

Kepler'in gezegensel hareket yasaları, öteki gezegenlerin yörünge boyutlarının, neredeyse yalnızca Dünya yörüngesinin boyutunun ne kadar iyi ölçülebileceğindeki belirsizlikle kısıtlanan bir doğruluk oranıyla, tam olarak hesaplanabilmesini sağlamıştır. Daha 1672 gibi bir tarihte, Mars'ın farklı konumlardan aynı anda gözlenmesi, Dünya-Güneş mesafesinin yaklaşık 140 milyon kilometre olarak hesaplanabilmesini sağladı; 149.597.871 kilometrelik doğru rakama son derece yakın bir değer bu. 1761 ve 1769'da (bu ikinci tarih Kaptan Cook'un Tahiti'de mevzilenmesini gerektirmiştir) Venüs'ün güneşin diski boyunca geçişinin

gözlenmesiyle, 153 ± 1 milyon kilometrelik güncelleştirilmiş bir tahmin üretildi. Bunlara ve Güneş Sistemi'nin ölçeğine ve yapısına ilişkin, kendi içinde tümüyle tutarlı ve gelişmiş bir modeli güçlendirmeyi sürdüren öteki bilimsel ilerlemelere rağmen, Roma'da "güneş merkezli" kitapların basımına ilişkin papalık yasağı 1822'ye dek kaldırılmamıştır.

Bir gezegenden uzaklık bir kez belirlendiğinde boyutunun bulunmasının çok kolay olacağını düşünüyorsanız, affedilebilirsiniz. Oysa, büyük bir teleskopla bakıldığında bile gezegen diskinin çok küçük olması, Dünya atmosferinin parıltısıyla birleştiğinde, gezegenin açısal boyutunun (diğer bir deyişle, ne büyüklükte göründüğünün) ölçümünde önemli düzeyde belirsizliğe yol açar. Örneğin, William Herschel 1781'de Uranüs'ü keşfettiğinde, gezegenin diskine ilişkin ölçümü olduğundan % 8 büyüktü. Bir gezegenin boyutunun saptanması için en kesin teleskobik yöntem, ne büyüklükte göründüğünü ölçmeye çalışmaktansa, bir yıldızın önünden geçiş süresinin hesaplanmasıdır. Bu tür "gölgelenmeler" ender olaylardır, ama 19. yüzyıl sonuna gelindiğinde gezegenlerin boyutları önemli düzeyde bir doğrulukla belirlenmişti (1. Tablo).

Herschel Uranüs'ü rastlantı sonucu keşfetmişti, ama 1846'da Neptün'ün yeri, Uranüs'ün yörüngesindeki (tam bir elips olmasını engelleyen) küçük sapmaların kılavuzluğunda, bilinçli bir arama sonucunda bulundu; bu sapmalar, en iyi, görünmeyen bir dış gezegenin kütleçekimi etkisiyle açıklanabilirdi. Yeterince uzun bir zaman boyunca belgelendiğinde, Neptün'ün yörüngesinin de daha uzaktaki keşfedilmemiş bir gezegene işaret eden sapmalar

Tablo 1. Gezegenlerin boyutları (ekvator çapları).

Gezegen	1894'te yayımlanan değer*	Doğru değer
Merkür	4.720 km	4.880 km
Venüs	12.600 km	12.104 km
Dünya	12.756 km	12.752 km
Mars	6.760 km	6.794 km
Jüpiter	142.000 km	142.980 km
Satürn	119.000 km	120.540 km
Uranüs	53.600 km	51.120 km
Neptün	48.500 km	49.540 km

* C. Flammarion, *Popular Astronomy* (Chatto and Windus, Piccadilly).

sergilediği görüldü. Bunun tetiklediği araştırma sonucunda, 1930'da Plüton bulundu. Gökbilimciler ilk başta yeni bulunan bu dokuzuncu gezegenin boyut ve kütlesinin Uranüs ve Neptün'e benzediğini varsaydılar. Ancak, 1955'e gelindiğinde Plüton'un Dünya'dan daha büyük olamayacağı gösterilmişti; 1971'de tahmin Mars'ın boyutu düzeyine indirildi ve 1978'de de yüzeyine son derece yansıtıcı olan donmuş metanın hâkim olduğu bulundu; bu da fiziksel boyutunun, toplam parlaklığıyla uyumlu kalabilmek için, daha da küçük olması gerektiği anlamına geliyordu. Plüton'un çapının yalnızca 2.390 kilometre olduğunu artık biliyoruz, yani boyutu Merkür'ün bile altında (aslına bakılırsa, kütlesi ondan *çok* daha düşük). Neptün'ün yörüngesindeki, biraz da şans eseri Plüton'un aranmasına ilham kaynağı olmuş sapmalar artık gözlem hatalarına bağlanıyor.

Plüton resmi olarak tanınmış gezegen statüsünü 2006'da kaybetti. Tartışmalı olmakla birlikte, bana göre, doğru bir adımdı bu. Bunun nasıl olduğunu anlatmadan önce, şu anda anlaşıldığı haliyle Güneş Sistemi'nin yapısını özetleyeceğim.

Güneş Sistemi'ne genel bir bakış

Güneş

Güneş Sistemi'nin merkezinde, oldukça sıradan bir yıldız olan ve enerjisini çekirdeğinde hidrojenin nükleer füzyonla helyuma dönüşmesinden alan Güneş yer alır. Güneş'in çapı Dünya'nın çapının 109 ve kütlesi de Dünya'nın kütlesinin neredeyse 333.000 katıdır. Kütlesi, Güneş Sistemi'ndeki her şeyin toplamının yaklaşık 740 katıdır. Bu nedenle, Güneş'in kütleçekimi öylesine baskındır ki, Güneş Sistemi'ndeki nesneler Güneş'in etrafında, Kepler'in kabul ettiği neredeyse tam elipsler içerisinde dönerler. Bir gezegenin yörüngesinde öteki gezegenlerin yol açtığı sapmalar küçüktür, ama ölçülebilirler.

Gezegenler

Gezegenlerin bazı temel özellikleri Tablo 2'de özetlenmiş ve çok yüksek rakamlardan kaçınmak amacıyla Dünya'ya orantılı olarak verilmiştir. Güneş'ten uzaklık, ortalama Dünya-Güneş uzaklığı olarak tanımlanan ve AB

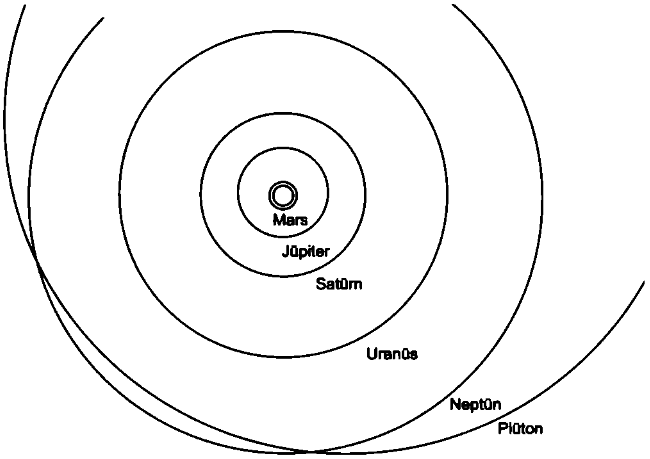
olarak kısaltılan "Astronomik Birimler"le ölçülür. 150 milyon kilometrelik (yaklaşık) bu rakamın hatırlanması oldukça kolaydır. Bir gezegenin yörünge süresi, Güneş'in etrafında bir turu tamamlama süresidir ve, elbette, o gezegenin kendi "yıl"ını oluşturur. Bu tabloda yörünge süreleri ve Güneş'ten uzaklıkları birbirleriyle Kepler'in Üçüncü Yasası üzerinden ilişkilendirilmiştir. Bu yasaya göre, herhangi bir gezegenin (Dünya yıllarıyla) yörünge süresinin karesi, Güneş'ten (AB olarak) ortalama uzaklığının küpüne eşittir. Dünya'nın kütlesi 6 milyon milyar milyar kilograma (ya da 6 bin milyar milyar tona) çok yakındır ve kilogram, saniye ve metre gibi standart bilimsel birimlerinin kullanılması yerine öteki gezegenleri Dünya'yla kıyaslamanın kolaylığı buradan gelir.

Dönme süresi, bir gezegenin kendi ekseni etrafında bir kere dönme süresidir. Hızlı dönen bir gezegen için bu süre, bir gün doğumundan ötekine geçen zamanla (gezegenin kendi "gün uzunluğu") neredeyse aynıdır. Dünya'nın dönüş süresi 23 saat 56 dakika, ama Güneş'in gökyüzünde aynı noktaya gelmesi için gereken dönüş süresi tam olarak 24 saattir. Gezegenin bakış açısından, yüzeyindeki herhangi bir noktadan Güneş'e bakan yönün gezegenin dönüşü nedeniyle değişmesine ek olarak, Güneş tek bir yörünge dönüşü içerisinde gökyüzünde tam bir daire çizer. Dönüşü gelgitle kilitlendiği için her yörüngede tam olarak bir kez dönen (senkronize dönüş) bir gezegenin sürekli olarak bir yüzü Güneş'e dönük olacaktır. Merkür bunun yerine *iki* yörünge sırasında tam olarak *üç* kez ve bunun sonucunda da her iki yörüngede Güneş'e *göre* bir kez döner; dolayısıyla, günü, yılının iki katı uzunluktadır.

Tablo 2. Gezegenlerin karşılaştırmalı olarak bazı özellikleri. Güneş'ten uzaklık, ortalama uzaklık anlamındadır. Yıl ve günler Dünya yıl ve günleridir. Boyutlar için bkz. Tablo 1.

Gezegen	Güneş'ten uzaklık /AB	Yörünge süresi /yıl	Kütle (Dünya'ya oranla)	Dönüş süresi /gün
Merkür	0,387	0,241	0,055	58,6
Venüs	0,723	0,615	0,81	243,0
Dünya	1,0	1,0	1,0	1,0
Mars	1,52	1,88	0,11	1,026
Jüpiter	5,20	11,86	318	0,410
Satürn	9,58	29,46	95,2	0,444
Uranüs	19,1	84,01	14,5	0,718
Neptün	30,0	164,8	17,2	0,768

Dört iç gezegenle dört dış gezegen arasında bir nitelik değişimi görülür. İç gezegenler (Merkür, Venüs, Dünya ve Mars) dört dış gezegene (Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün) kıyasla görece küçüktür ve kütleleri daha düşüktür. Yoğunluklarında da farklılık gözlenir; iç gezegenler dış gezegenlerden daha yoğundurlar. İç gezegenlere, hepsinin "Dünya'ya benzer" olmaları anlamında, "yerbenzeri gezegenler" denir. Dört dış gezegense "dev gezegenler"dir. Çok fazla hidrojen ve helyum içerdikleri gerçeğini yansıtmak için bunlara "gaz devleri" diyenler de vardır. Bazılarıysa bu terimi, yalnızca, diğer ikisinin de bir Dünya kütlesinden fazla gaz içermelerine rağmen, gaz düzeyi onlardan yüksek olan Jüpiter ve Satürn için kullanırlar.



1. Güneş Sistemi'nin haritası; gezegen yörüngeleri doğru göreceli boyutlarda gösterilmiştir. Yörüngeler çok az dış merkezlidir, yani görünüşleri daireden neredeyse ayırt edilemez. Mars'ın yörüngesi içindeki etiketlenmemiş daire Güneş değil, Dünya'nın yörüngesidir! Venüs ve Merkür'ün yörüngeleri buraya dahil edilemeyecek kadar küçüktür. Plüton gezegen değildir, ama Neptün'ün yörüngesinin ötesindeki çok sayıda küçük gökcismini temsil edecek nitelikte olduğu için, yörüngesi burada gösterilmiştir.

Şekil 1'de, yörüngeleri ölçeklendirilmiş olarak, Güneş Sistemi'nin haritası verilmiştir; ancak Venüs ve Merkür'ün yörüngeleri buraya dahil edilemeyecek kadar küçüktür. İlerideki tartışmada yararlı olması amacıyla, Plüton'un yörüngesinin bir bölümü de gösterilmiştir. Henüz bahsetmediğim, ama yokluğunda böyle bir haritanın çizilemeyeceği bir şey var; gezegen yörüngelerinin hepsi yaklaşık

olarak aynı düzlemdedir. "Eliptik" olarak bilinen elverişli bir referans düzlemi oluşturan Dünya yörüngesine göre, Plüton'un yörüngesi 17,1^0, Merkür'ün 7,0^0, Venüs'ün 3,4^0 ve ötekilerin hepsinin 3^0'den az eğimlidir.

Plüton enberisine yakın olduğunda Neptün'ün yörüngesinin içindedir, ama çarpışmaları olasılığı bulunmamaktadır. Yörünge eğikliklerinin farklılığı yollarının kesişmesini engeller; üstelik, Plüton'un Neptün'ün yörüngesi içinden her geçişinde Neptün hep Güneş'in öteki tarafındadır. Bunun mümkün olmasının nedeni, Neptün'ün tamamladığı her üç yörüngeye karşılık Plüton'un tam olarak iki yörüngeyi tamamlamasıdır. Bu tür bir ilişki 3:2 yörünge rezonansı olarak adlandırılır.

Yörüngelerinin neredeyse eşdüzlemli olmalarının yanı sıra, her gezegen Güneş'in etrafında aynı şekilde döner: Dünya'nın kuzey kutbunun çok yukarısındaki hayali bir bakış noktasından görüldüğü şekliyle, saat yönünün tersine hareket ederler. Saat yönünün tersine hareket, Venüs ve Uranüs hariç her gezegenin kendi ekseni etrafında dönme yönünde de görülür. Saat yönünün tersine hareket bu denli yaygın olduğundan, "düz" olarak adlandırılır. Saat yönünde yörünge hareketi ya da dönüşüyse geriye doğru dönüş sayılır ve "ters" olarak anılır.

Uranüs hariç her gezegenin etrafında döndüğü eksen, yörünge düzlemine dik açılı olmaktan 30^0'den az uzaklıktadır. Merkür yalnızca 0,1^0'lik eğikliğiyle neredeyse "mükemmel"dir, Dünya'nın ekseniyse 23,5^0 eğikliktedir. On binlerce yıl içerisinde ölçüldüğünde, bir gezegenin ekseninin işaret ettiği yön ve eğiklik miktarı değişir, ama tek bir yörüngenin zaman ölçeği içerisinde fiilen sabittir.

Mevsimlerin nedeni eksen eğikliğidir; Dünya'da kuzey yarıkürede yaz, yörüngenin, Dünya ekseninin kuzey ucunun Güneş'e *doğru* eğildiği kısmıdır ve kuzeyin kışıysa altı ay sonra, Dünya'nın Güneş'in öteki tarafında olduğu ve bu nedenle eksenin kuzey ucunun Güneş'ten *öteki* tarafa eğik olduğu zamandır. Buna uymayan iki gezegenden Venüs'ün ekseni yalnızca 2,7° eğikliktedir, ama ters yönde çok yavaş döner (bu nedenle gündüz uzunluğu 116,7 Dünya günüdür); Uranüs'ün ekseniyse 82,1° eğiklikte ve hızlı ters dönüşlüdür. Uranüs muhtemelen bir felaket yaşamış ve başlangıçtaki düz dönüşü 97,9° eğilmiştir (97,9°, 180° eksi 82,1°'ye eşittir). Böyle bir olay, dönüş yönünü tersine çevirecek ayrı bir olaya gerek kalmadan, şu andaki durumla sonuçlanacaktır.

Gezegenlerin uyduları

Merkür ve Venüs hariç tüm gezegenlerin uyduları ya da "ayları" vardır. Bunlar gezegene Güneş yerine onun etrafında dönecek kadar yakın, daha küçük gökcisimleridir. Tam olarak söylersek, bir gezegenle uydusu ortak kütle merkezinin etrafında dönerler. Ancak, kütleleri uydularından çok daha yüksek olduğundan, gezegenlerin kütle merkezleri gezegenin içindedir ve uyduların kendi gezegenlerinin etrafında döndüklerini söylemek genellikle gayet doğru olacaktır. Çoğu uydunun yörüngesi gezegeninin ekvator düzlemine yakındır ve büyük uyduların neredeyse tamamı, gezegenin dönüşüyle aynı yönde dönmek olarak tanımlanan, düz yörüngelerdedir.

Dünya'nın uydusu elbette Ay'dır (büyük A'yla). Çapı Dünya'nın çapının % 27'si ve kütlesi de % 1,2'si kadar olan Ay, gezegenine kıyasla görece büyük olması açısından sıradışıdır. Rastlantı eseri, Ay'ın boyutu ve Dünya'dan uzaklığı, çok daha büyük ama daha uzakta olan Güneş'le neredeyse aynı görünmesine yol açacak düzeydedir. Ay tam olarak Dünya'yla Güneş arasından geçtiğinde Güneş'in diskini gizleyerek güneş tutulmasına neden olur. Ay'ın Dünya etrafındaki yörüngesi Dünya'nın yörüngesiyle tam olarak eşdüzlemli olsaydı, her ay yörüngesinde (yani her ay) bir tutulma olurdu. Ancak, Ay'ın yörüngesi eliptiğe % 5,2 eğiklikte olduğundan, tutulmalar enderdir ve ancak Ay'ın yörüngesinin eliptiği geçtiği iki noktadan birinde Dünya'yla Güneş arasından geçtiğinde gerçekleşir. Bu olayların döngüselliğini ortaya çıkarmak ve tutulmaların ne zaman gerçekleşeceğini (nedenlerini tam olarak anlamadan da olsa) tahmin etmek, bundan 2.600 yıl önce Babilli gökbilimcilerin en büyük başarılarından biri olmuştu. Ay'ın Dünya'nın gölgesine girdiği ay tutulmaları da aynı döngünün kontrolündedir, ama, Dünya'nın gölgesi Ay'ınkinden çok daha büyük olduğundan, daha sık gerçekleşir.

Mars'ın iki küçük uydusu bulunmaktadır. Jüpiter'in çapı 3.000 kilometreyi geçen dört uydusu (Galileo'nun keşfettikleri) ve, ayrıca, son sayıma göre, 200 kilometrenin altında (çoğu 4 kilometrenin altında) 59 başka uydusu vardır. Satürn'ün bilinen toplam uydu sayısı da benzer düzeydedir, ama bunlardan yalnızca biri Jüpiter'in en büyük uydusuna rakip çıkabilir. Uranüs'ün 400'le 1.600 kilometre uzunlukta beş uydusu ve bilinen 22 daha küçük uydusu vardır ve Neptün'ün de bir büyük uydusu ve bilinen bir düzine küçük

uydusu bulunmaktadır. Jüpiter ve Satürn'ün küçük (birkaç kilometrelik) dış uydularının çoğu (buralardan geçen uzay araçlarıyla değil) teleskoplarla keşfedilmiştir ve başta Uranüs'le Neptün olmak üzere dev gezegenlerin henüz bulunmamış başka küçük uydularının da olduğu kesindir; bu iki gezegende uyduların teleskopla saptanması iki nedenden ötürü son derece zordur: Güneş'ten uzaklıkları daha fazla olduğundan daha az aydınlanırlar ve Dünya'dan uzaklıkları daha fazla olduğundan, aynı derecede iyi aydınlanıyor olsalardı bile, daha soluk görünürlerdi.

Büyük uydular jeolojik açıdan son derece ilgi çekicidir ve ileride haklarında daha fazla bilgi vereceğim, ama gezegenlerinin ağırlıklarının bulunmasını sağladıklarından, gezegen bilimciler açısından uyduların hepsi yararlıdır. Bir uydunun yörünge süresi yalnızca gezegenin merkezinden ortalama uzaklığına ve (Newton'un, Kepler'in Üçüncü Yasası'na getirdiği kütleçekimi detaylandırması kullanılarak hesaplanabilecek) toplam kütlelerine bağlıdır. Uydular çok daha küçük olduklarından, tıpkı gezegenlerin Güneş etrafındaki yörüngelerinin uzaklığa ve güneşin kütlesine bağlı olması gibi, ağırlık neredeyse tümüyle gezegenin kütlesindedir.

Asteroitler, Neptün ötesi cisimler ve kuyrukluyıldızlar

Bu kitap tüm Güneş Sistemi'nden çok gezegenler hakkında, ama başka tiplerde cisimlerin, elbette küçük olmalarına ve toplam kütlelerinin görece önemsiz kalmasına

rağmen, gezegenlerin ve uydularının toplam sayısını fazla fazla aştıklarını da belirtmekte yarar var. Gezegen bilimciler sınırların az çok bulanık olduğunu fark etmeye başlamışlarsa da, bu "çöp" cisimler üç geniş sınıfa ayrılabilir: asteroitler, Neptün ötesi cisimler ve kuyrukluyıldızlar.

Asteroitlerin boyutları 950 kilometreden (en büyük örnek olan Ceres'in çapı) başlayarak aşağı doğru iner ve alt sınır yoktur. Yalnızca birkaç metrelik asteroitler Dünya yakınlarından geçtikleri sırada saptanmıştır ve daha küçüklerin de yere düşen parçaları göktaşı olarak bulunabilmektedir. Eskiden bunların yok olmuş gezegenlerin parçaları oldukları sanılırdı, ama artık asteroitlerin hiçbir zaman gezegen büyüklüğünde bir cisme ait olmadıklarını düşünüyoruz. Tüm asteroitlerin toplam kütlesi muhtemelen Dünya'nın kütlesinin binde birinden azdır. Şekillerinin düzensizliğinin de doğruladığı üzere, bazılarının çarpışma geçirmiş oldukları açıktır.

Asteroitlerin yörünge hareketleri istisnasız düzdür. Çoğunun yörünge eğikliği 20^0'nin altındadır, ama dış merkezlilik tipik olarak gezegenlerdekinden fazladır. Asteroitlerin çoğunun yörüngesi Mars ve Jüpiter'in yörüngeleri arasındadır ("asteroit kuşağı"), ama bazıları Güneş'e çok daha fazla yaklaşır, Dünya'nın ve hatta (bir avuç dolusu örnekte) Merkür'ün içerlerine doğru geçer. Satürn'ün ötesinde dolandığı bilinen birkaç asteroit vardır. Onlardan türeyen göktaşları gibi, asteroitlerin çoğunun bileşimleri de kayalık ya da karbonludur, ama bazıları demir ve nikelden oluşur. Bilebildiğimiz kadarıyla Güneş'ten uzaklaşıldıkça asteroit bileşiminde kaya azalmakta, daha karbonlu ve nihayet daha buzlu olmaktadır.

Neptün'ün yörüngesinin ötesinde, Güneş'ten 30-55 AB arası uzaklıkta küçük buzlu gökcisimleri çoğalır ve aralarından bazılarının boyutu en büyük asteroitleri aşar. 1951'de burayı buzlu yığınların Güneş Sistemi'nin doğumundan artakaldığı bir bölge olarak öngören Hollandalı-Amerikalı Gerard Kuiper'a atfen, bu bölgeye genellikle "Kuiper kuşağı" denir. İrlandalı Kenneth Edgeworth, 1943'te, daha az bilinen bir yayında benzer şeyler söylemiş olduğundan, "Edgeworth-Kuiper kuşağı" olarak adlandırmayı yeğleyenler de vardır. Keşfedilip bu nitelikte sayılan ilk Kuiper kuşağı cismi 1992'de bulundu, ama şu anda yüzlercesi daha kataloglanmış durumda ve Plüton'un da onlardan biri sayılması gerektiği anlaşıldı. Enberileri Neptün'ün yörüngesinin ötesinden çok uzakta olmayan, ama enötesinde yaklaşık 100 AB'ye ulaşan benzer cisimlerse "Dağınık Disk" cisimleri sayılır. Bunlar, Kuiper kuşağıyla birlikte, hepsinin yörüngeleri düz olan "Neptün Ötesi Cisimler" (NÖC) adlı bir aile oluştururlar. NÖC'lerin toplam kütlesi muhtemelen asteroit kuşağı kütlesinin 200 katına yakındır (bir Dünya kütlesinin beşte biri) ve toplamda boyutu 100 kilometreyi aşan yaklaşık 100.000 cisim olabilir. 2005'te keşfedilen ve sonradan Eris adı verilen bir "Dağınık Disk" cismi Plüton'dan biraz büyük görünmektedir. İkisinin de yörüngeleri gayet iyi belgelenmiş uyduları bulunduğundan ve bu uydular Eris'in kütlesinin Plüton'unkinden % 28 fazla olduğunu gösterdiklerinden, kütleleri konusunda daha güvenli olabiliyoruz.

Kuyrukluyıldızlar Güneş yakınlarından geçerken gökyüzü boyunca uzanabilen, gaz ve tozdan oluşma kuyruk-

lar geliştirmeleri sayesinde kısa bir süreliğine son derece göz alıcı görünebildiklerinden, antik çağlardan beri bilinmektedirler. Ancak, bir kuyrukluyıldızın katı kısmı, çoğu örnekte yalnızca birkaç kilometre uzunlukta olan tozlu buz yığınından ibarettir (ünlü bir tanımlamayla, "kirli kartopu"). Bir kuyrukluyıldız zamanının çoğunu Güneş'ten uzakta geçirir ve kuyruğu ancak Güneş'e onu ısıtacağı bir yakınlıktan geçtiğinde oluşur. Kuyrukluyıldızların enberinin genellikle Dünya yörüngesinin içinde, ama enötesinin Jüpiter yörüngesinin yakınlarında ya da çok ötesinde olduğu aşırı derecede dış merkezli yörüngeleri olduğundan, bu durum ender görülür. Bazıları o kadar uzaktan gelirler ki, yörüngeleri parabole (sonsuz uzunlukta elipsler) benzer ve kayıtlı tarih içerisinde yalnızca bir kez Güneş'in yakınından geçerler. Bunlar "uzun süreli" kuyrukluyıldızlardır ve, görünüşe bakılırsa, Güneş'i yaklaşık 50.000 AB uzaklıktan saran ve Oort Bulutu olarak bilinen, yeterince tanımlanmamış bir yerden kopup gelmiş olabilirler. "Kısa süreli" kuyrukluyıldızlarsa, aksine, ilk başta muhtemelen Dağınık Disk cisimleriydiler ve başka bir cisimle yakın temas sonucunda enberi uzaklığı düşük olan bir dış merkezli yörüngeye itilmişlerdir. Yörünge süreleri yüzlerce yıl olanların enöteleri hâlâ Dağınık Disk'tedir, ama dev bir gezegenle yakın karşılaşma sonucunda Güneş'e doğru itilebilir. Örneğin, Halley kuyrukluyıldızının enötesi Neptün'ün yörüngesine yakın ve yörünge süresi 75 yıl, Encke kuyrukluyıldızının enötesiyse Jüpiter'in yörüngesine yakın ve yörünge süresi yalnızca 3,3 yıldır. Kuyrukluyıldızlar Güneş'in ısısının onları her ısıtışında gaz salarak kütle kaybederler, yani binden az enberi geçişi sonrasında bir kuyrukluyıldız muhte-

melen asteroitten ayırt edilmesi zor, atıl bir buzsuz kaya ve toz yığınına indirgenir.

Kaynakları düşünüldüğünde bekleneceği üzere, "kısa süreli" kuyrukluyıldızların yörüngeleri düz ve genellikle elipse yakındır. Ancak, yörüngeleri son derece eğik, hatta ters olabilen uzun süreli kuyrukluyıldızlar için bu tür bir kısıtlama geçerli değildir.

Gezegen nedir?
Plüton nasıl oldu da kulüpten atıldı?

1930'da Plüton keşfedilen ilk NÖC oldu. Boyutunun (ve sonrasında 1978'de en büyük uydusunun keşfedilmesi sayesinde kütlesinin) küçüklüğünün anlaşılmasından sonra bile insanlar Plüton'u dokuzuncu gezegen olarak düşünme eğilimini sürdürdüler. Ancak, bilinen Kuiper kuşağı nüfusu birçoğunun boyutu Plüton'a rakip olacak yüzlerce cisme çıktığında, Plüton'u gezegen, öteki Kuiper kuşağı cisimlerini ise başka bir şey olarak sınıflandırmak giderek tuhaflaştı. Eris'in kütlesinin ve muhtemelen büyüklüğünün Plüton'dan yüksek olduğu doğrulandığında, mantıksal olarak ya tüm büyük NÖC'lerin gezegen sayılması ya da hiçbirinin sayılmaması gerekti. Ancak, birçok kişi duygusal ya da tarihsel gerekçelerle Plüton'un gezegen olarak tutulmasını savundu.

"Gezegen" teriminin hiçbir zaman kesin olarak tanımlanmamış olması bir karar alınmasını güçleştirdi. Sonunda, 2006'da, Prag'da gerçekleştirilen son derece hararetli bir Uluslararası Gökbilim Birliği toplantısında yapılan

oylamada, delegeler, meseleyi büyük oranda çözüme kavuşturan bazı tanımları oylayarak, kabul ettiler. Gezegen olma konusunda iki kriter tartışmalı değildi: IAU, ilk olarak, kendi kütleçekiminin "katı cisim güçleri"nin üstesinden gelmesi ve böylece hidrostatik bir denge biçimini (neredeyse yuvarlak) almasını sağlamaya yetecek bir kütleye sahip olması, ikinci olarak da yörüngesinin Güneş etrafında olması gerektiğine karar verdi. Bu ikinci kriter, bizim Ay'ımız gibi büyük uyduları dışarıda bırakıyordu.

Üçüncü kriterse kritik önemdeydi. Bu kritere göre, bir gökcisminin gezegen sayılabilmesi için, "yörüngesinin etrafındaki mahallesini" çok daha küçük cisimler hariç her şeyden TEMİZLEMİŞ olması gerekir. Plüton'un geçemediği sınav işte budur. Plüton mahallesini benzer boyutta birçok gökcismiyle ve hatta kütlesi çok daha yüksek olan Neptün'le paylaştığından, mahallesini temizleyememiştir. Öteki taraftan, Neptün sınavı *geçer*, çünkü kütlesi, aynı yörünge bölgesindeki (Plüton gibi) her şeyin binlerce katıdır.

Plüton'u gezegenler kulübünden atmak gibi cesurca, ama tümüyle mantıklı bir adımı atmış olan IAU anlaşılan bu kararından hemen pişman oldu ve ait olabileceği bir değil, iki yeni sınıf birden icat etti. 2006 Prag toplantısında yeni oluşturulan "cüce gezegen" terimi, "yörüngesi Güneş etrafında olan, kütleçekiminin onu neredeyse yuvarlak bir biçime sokmasına yetecek bir kütlesi bulunan, yörünge mahallesini temizle*meme*miş ve uydu olmayan bir gökcismi" olarak tanımlandı. Şeklin "neredeyse yuvarlak" olup olmadığının uzaktan belirlenmesi zordur ve tanımlanması tartışmalıdır, ama IAU bu tanımı kabul ederek Plüton,

Eris ve Ceres'e (en büyük asteroit) "cüce gezegen" sayılmak gibi bir teselli ödülü verdi. O dönemde, öteki büyük NÖC'lerin gerektiği gibi ölçüldüklerinde cüce gezegen sınıfına girecekleri kabul edildi ve gerçekten de, 2008'de, Plüton'un üçte iki büyüklüğünde olduğu tahmin edilen Makemake (dört hece olarak telaffuz edilmektedir) adında bir cismin biçim sınavını geçtiğine karar verilerek, dördüncü cüce gezegen olarak kabul edildi; hemen ardından, Haumea adında bir beşincisi onu izledi.

Görünüşe bakılırsa, IAU Plüton benzeri cisimleri Ceres'le aynı kategoriye sokuşturduğuna pişman oldu ve 2008'de Neptün Ötesi cüce gezegenleri ayırmak için yeni bir terim icat etti: "Plütoid". Dolayısıyla, Ceres, Plütoid olmayan tek cüce gezegendir ve bu sınıfta ona katılmaya yetecek büyüklükte, henüz keşfedilmemiş bir asteroit de yoktur. Ancak, hem Plütoid *hem* cüce gezegen olarak Plüton, Eris, Makemake ve Haumea'ya katılacak, keşfedilmemiş ya da yeterince belgelenmemiş sayısız büyük NÖC olabilir. Sırası gelmişken, Eris adını (neden olduğu itilaf düşünüldüğünde yerinde bir yaklaşımla) klasik Yunan nifak tanrıçasından, Makemake ve Haumea ise Pasifik adasının bereket ilahlarından almışlardır.

Bütün bunlar nasıl oldu?

Büyüyen gezegenler

Yakın zamanlara dek, gezegenlerin kozmosta ender olduklarını savunmak mümkündü, ama yıldız oluşumunun

olağan bir yan ürünü oldukları artık açık görünüyor. Dolayısıyla, bizim Güneş Sistemimizin varlığı, Güneş'in oluşumunun bir sonucudur.

Yıldızların çoğunlukla hidrojenden oluşan, ama başka birkaç gazla ve toz olarak nitelenen küçük, katı parçacıklarla da karışmış olan devasa bir yıldızlararası bulutun kendi kütleçekiminin etkisi sonucunda içine çökmesiyle oluştuğuna inanılır. Bulut çöktükçe maddenin çoğu merkezde, içe çökme sürecinde ısıya dönüşen kütleçekimi enerjisi nedeniyle giderek sıcaklaşan bir gökcisminde yoğunlaşır. Sonunda merkez basıncı ve sıcaklığı öylesine yükselir ki, hidrojen çekirdekleri kaynaşarak helyum oluşturmaya başlar ve bu aşamada merkez gökcismine yıldız denebilir. Gezegenler son aşamalarda geride kalan maddelerin bazılarından oluşup büyürler. Açısal momentumun korunumu, bulutun ilk baştaki herhangi bir küçük dönüşünün çökme sırasında hızlanmasına ve yıldıza katılmayan maddenin yıldızın ekvator düzleminde yıldızla aynı yönde dönen bir diskte yoğunlaşmasına neden olur.

Gezegenler bu dönen diskte oluşur. Bizim Güneş Sistemimizi doğuran disk, güneş nebulası olarak adlandırılmaktadır; "nebula" Latince "bulut" demektir ve gökbilimciler bu terimi uzaydaki herhangi bir büyük gaz ve/veya toz kütlesi için kullanırlar. Güneş nebulasının bileşiminin yaklaşık % 71 hidrojen, % 27 helyum, % 1 oksijen, % 0,3 karbon ve % 0,1'er oranlarında nitrojen, neon, magnezyum, silikon ve demirden oluştuğuna inanılması için güçlü nedenler bulunmaktadır. Güneş nebulasında ilk başta bulunan tozun neredeyse tamamı, genç Güneş'ten gelen ısıyla muhtemelen buharlaşmıştı, ama çok geçmeden nebula

yeni toz taneciklerinin bireysel unsurlar değil, kimyasal bileşimle üretilmiş bileşikler olarak yoğunlaşmasına yetecek kadar soğudu. Helyum kimyasal bileşenlere girmez, yani yoğunlaşabilecek en bol bileşikler ya hidrojen ya da oksijen içermektedir.

Mevcut elementler ve yerel sıcaklık ve basınç sayesinde, oksijen, silikonla ve çeşitli metallerle birleşerek, nebulanın iç kısmında silikatlar denen çeşitli bileşikler oluşturdu. Dünya'da yaygın olarak görülen ve ergimiş kaya soğuduğunda kristalleşen minerallerdir bunlar, ama güneş nebulasında doğrudan gazdan geliştiler. Hidrojen katı parçacıklara ancak sıcaklığın hidrojen içeren bileşiklerin oluşabileceği kadar düşük olduğu yerlerde girdi ve bu da Güneş'ten yaklaşık 5 AB uzaklık ötesinde gerçekleşmiş gibi görünüyor. Bu "buz hattı"nda ve ötesinde, (hidrojen artı oksijenden oluşan) su, buz zerrecikleri halinde yoğuşabildi. Güneş'ten uzaklaştıkça, hidrojenin karbonla birleşerek metan, nitrojenle birleşerek amonyum ve karbonun oksijenle birleşerek ya karbon monoksit ya da karbondioksit oluşturduğu daha kararsız bileşikler oluştu. Yaklaşık 30 AB uzaklık, nitrojenin katı, saf nitrojen parçacıkları olarak yoğuşabileceği kadar soğuktu. Gezegen bilimi söz dağarcığının tuhaflıklarından biriyle, su, metan, amonyum, karbonmonoksit, karbondioksit ya da nitrojenden (hatta bunların herhangi bir karışımından) oluşan *herhangi* bir katı maddeye, köken ve özellik benzerlikleri dikkate alınarak, "buz" denir. Yani belirsizlikten kaçınmak için gezegen bilimcilerin özellikle donmuş sudan bahsederken "su-buzu" nitelemesini yapmaları gerekir – sıcaklığın sudan daha kararsız bileşiklerin doğal yoldan donamayacağı

kadar yüksek olduğu Dünya'da ender olarak karşılaşılan bir sorundur bu.

Yoğuşma öyle bir şekilde oluştu ki, ilk toz tanecikleri –Güneş yakınlarında silikattan ve Güneş'ten uzaklaştıkça buzdan (ayrıca bazı artakalmış silikatlardan) oluşmuş mikroskobik zerrecikler– yoğun, katı zerrecikler olarak gelişmediler. Bunun yerine, karmaşık, "tüysü" biçimleri vardı ve birbirlerine çarptıklarında geriye sekmekten çok, genellikle birbirlerine tutundular. Yoğuşmanın sürmesinin ve çarpıştıklarında oluşan eklenmenin (birbirlerine yapışma) birleşik etkisinin sonucunda, yoğuşmanın başlamasından sonra on bin yıl gibi kısa bir süre içerisinde, yaklaşık bir santimetre uzunluğunda küreciklere dönüşebildiler. Belki 100.000 yıl sonra Güneş Sistemi "gezegenimsi" olarak anılacak, 10 kilometre uzunlukta yığınla gökcismi içerecekti. Bunların hepsi aynı düz yönde Güneş'in etrafında dönüyor ve geriye kalmış gaz ve tozdan oluşma dağınık bir sisin içinde yer alıyorlardı.

İlk taneciklerden bazıları göktaşlarının içinde değişmeden kalmış olduğundan, bunun ne kadar zaman önce gerçekleştiğini biliyoruz. İçlerindeki radyoaktif bozunma ürünlerini ölçerek yaşlarını hesaplayabiliyoruz; unutulmaz bir sayı bu: 4,567 milyar yıl. Isınma ya da değişmeye hiç maruz kalmamış küçük gezegenimsilerin parçacıkları olan en "ilkel" göktaşlarına "karbonlu kondritler" denir ve erken Güneş Sistemi'ndeki şartlara ilişkin en doğrudan kanıtları oluştururlar.

Bu zamana dek çarpışmalar temelde rastlantıya bağlıydı, ama gezegenimsiler bir kez yaklaşık 10 kilometre boyutuna ulaştığında, aralarından en büyüklerinin yük-

sek kütleçekimleri kendini hissettirdi. Bunlar daha fazla çarpışmaya maruz kaldılar ve, dolayısıyla, büyüme hızları ötekileri geride bıraktı. Birkaç on bin yıl içinde en büyük gezegenimsiler yaklaşık bin kilometre uzunluğuna ulaşmış ve bu süreçte daha küçüklerin çoğunu yutuvermişlerdi.

Bu büyük gezegenimsilere yeni bir ad yakıştırılır: "gezegen embriyoları". İç Güneş Sistemi'nde bunlardan belki birkaç yüz tane oluştu. Kütleleri, kendi kütleçekimlerinin onları küresel şekillere çekebileceği kadar yüksekti. İçleri ergimenin oluşmasına, demirin içe çökerek belirgin bir çekirdek oluşturmasına yetecek kadar sıcak olabilir, ama sonradan olanlar nedeniyle, bu, büyük oranda önemsizdir.

Yerbenzeri gezegenler işte bu gezegen embriyolarından oluştu. Küçük malzemelerin çoğu artık ortadan kalktığından, önemli düzeyde büyüme ancak iki embriyonun çarpışmasıyla gerçekleşebilirdi. Bu tür çarpışmaya "dev çarpma" denir ve çarpışmanın oluşturduğu kaynaşmış cismi büyük ölçüde ergitmeye yetecek kadar ısı salar. Yüzeyindeki birkaç soğumuş cüruf yığını dışında sıcaktan kıpkızıl parlayan, derinliklerinde bir demir damlacıkları "yağmurunu"nun silikat magma arasından içeriye doğru çökerek merkezi çekirdeğe eklendiği bir ergimiş demir küresini düşünürseniz, dev bir çarpmanın ertesinde bir gezegen embriyosunun durumu gözünüzde canlanmış olur.

Burada çarpmanın iki cismi de paramparça etmediği, ama kaçınılmaz olarak bir miktar döküntünün çarpışmanın püskürtüsü olarak uzaya atılacağı varsayılır. Gezegen embriyolarının birbirini izleyen dev çarpmaları sonucunda Dünya büyüklüğünde bir gezegenin oluşması muhtemelen yaklaşık 50 milyon yıl almıştır. Çarpışmaların rasgele ol-

ması ve kendileri de dev çarpmalar sonucunda oluşmuş gökcisimleri arasındaki dev çarpmaların karmaşık "soyağacı" nedeniyle, sürecin erken safhalarındaki herhangi bir tek embriyoyu "ön-Dünya" ya da "ön-Venüs" saymak anlamsızdır.

Mars'ın yörüngesinin ötesinde, genç Jüpiter'in kütleçekimi etkisi kayalık gezegenimsileri daha dış merkezli yörüngelere yöneltecek kadar güçlüydü; bu nedenle, karşılıklı çarpışmalar çoğunlukla eklenme yoluyla büyümeye izin vermeyecek kadar şiddetli oldu. Bunun yerine yaygın sonuç parçalanmaydı; bu nedenle, ileride çarpışarak beşinci bir yerbenzeri gezegen üretebilecek büyük gezegen embriyoları burada büyüyemedi. Günümüzde asteroitlerin çoğunu bu bölgede buluyoruz; bunlar, bir zamanlar burada bulunan kütlenin yalnızca küçük bir kesitini temsil ediyorlar. Jüpiter çoğunu son derece dış merkezli yörüngelere dağıttı, bu nedenle, zamanla çoğu Jüpiter'le ya da başka bir dev gezegenle çarpıştı veya Güneş Sistemi'nden tümden fırlatılıp atıldı.

Dev gezegenlerin oluştuğu gökcisimlerinde kaya kadar buz oranı da yüksekti. Burada, "buz hattı"nın ötesinde, büyüyen gezegenleri besleyecek çok daha fazla malzeme vardı. Embriyo-embriyo çarpışmalarının rolü belirsizdir; bu kadar çok gaz edinmelerini sağlayan mekanizma da öyle. Bir kurama göre, 10 ya da 15 Dünya-kütlesini aştıklarında, kütleçekimleri geride kalan nebulada kalabilmiş gazları yüksek miktarda yağmalamaya yetecek düzeydeydi, böylece kayalık ve buzlu iç kısımları derin, gazlı zarflarla kaplandı. Bir başka düşünce okuluna göreyse, nebuladaki kütleçekimi istikrarsızlıkları, her bir dev gezegenin, gazın

büyüyen gezegenin etrafında toplandığı, son derece yoğun bir düğüm içinde büyümesine yol açtı.

Güneş Sistemi'nin iç ve dış kesimlerindeki gezegen gelişimlerinin göreceli hızları konusunda da fikir ayrılıkları vardır ve Jüpiter'in Dünya'yla Venüs'ten önce mi, sonra mı oluştuğu kesin değildir. Ancak, Satürn, Uranüs ve Neptün embriyo-embriyo çarpışmaları sonucunda büyüdülerse, Jüpiter'den daha yavaş büyümüş olmalıdırlar, çünkü Güneş'ten uzaklık arttıkça çarpışma sıklığı azalmalıdır.

Güneş adını günümüzde bu süreçten geçmekte olan T Tauri yıldızından alan "T Tauri" evresine girdiğinde, nebuladan gaz yağmalaması sona erdi. Belki on milyon yıl boyunca, yıldızdan gelen ve "T Tauri rüzgârı" denen güçlü bir gaz çıkışı, geriye kalmış tüm gaz ve tozu uzaklaştırır. Uranüs'le Neptün'de öteki dev gezegenlere kıyasla daha az gaz bulunmasının olası bir nedeni, büyümeleri daha uzun sürdüğünden, T Tauri rüzgârının sürece son vermesinden önce gaz toplamak için daha az zaman bulabilmiş olmalarıdır.

Göç eden gezegenler

Bir başka tartışma konusuysa yörüngelerin zaman içerisinde değişme biçimleri ve özellikle dev gezegenlerde bunun ne derece gerçekleşmiş olduğu konusundadır. Güneş nebulası dağılana dek, nebula malzemesiyle yörüngedeki büyük gökcisimleri arasındaki kütleçekimi etkileşimleri yörünge yarıçaplarını aşamalı olarak azaltma eğiliminde olacak, embriyoların ve genç gezegenlerin içeriye göç etmesine yol açacaktır. Nebula dağılmasından sonra geze-

genlerle daha küçük gökcisimleri arasındaki kütleçekimi etkileşimleri daha da çarpıcı bir rol oynamış olabilir. En dıştaki dev gezegenin dışarılardaki buzlu gezegenimsilerin yörüngelerini içeriye doğru saptırdığı yarım milyar yıllık bir dönem önerisini getirenler vardır; bir sonraki dev gezegenle etkileşim sonucunda bu gezegenimsiler zamanla daha da içeriye doğru itilecek ve bu sürecin yinelenmesiyle Jüpiter'e, onun tarafından dışarıya doğru fırlatılabilecek derecede yaklaşacaklardır. Dışarıya fırlatılan bu buzlu gezegenimsiler günümüzün Oort Bulutu'nun kökeni olabilirler. Jüpiter dışarıya her gökcismi fırlatışında Güneş'e biraz yaklaşmış olmalı; öteki dev gezegenlerse, aksine, aralarından birinin bir buz yığınını içeriye doğru her savuruşunda dışarıya doğru itileceklerdir. Bu öyküde Jüpiter içeriye, Satürn, Uranüs ve Neptün dışarıya doğru göç ederler. Uranüs'le Neptün'ün yer değiştirmiş olmaları bile mümkündür (Uranüs'ün ekseninin günümüzdeki durumuna eğilmiş olmasına yol açacak bir fırsatın oluşması şartıyla). Günümüzün NÖC'leri, Neptün'ün dışarıya doğru ilerleyişi sırasında süpürülen bölgenin ötesinde varlıklarını korumuş olanlardır.

Bir gezegenin yörüngesinin hızla ya da çarpıcı derecede değişebileceği izlenimine kapılmayın lütfen. Venüs ve/veya Mars'ın Kutsal Kitap çağlarında Dünya'nın yakınından geçtiği ve çeşitli mitlere ve doğal afetlere kaynaklık ettiği iddialarının elle tutulur yanı yoktur. Betimlemiş olduğum dışarıya doğru gezegen göçleri son derece yavaş ve nebula gazıyla artık mevcut olmayan çok sayıda küçük cismin kümülatif etkileşimlerinin sonucunda gerçekleşti.

Yine de, gezegenlerin ve karşılıklı kütleçekimlerinin yapıları sürekli değişmektedir. Kaos kuramına göre, bu

nedenle, gezegen konumlarının birkaç milyon yıl sonrasından ötesini öngörmek olanaksızdır. Ancak, Güneş Sistemi'nin önümüzdeki birkaç milyar yıl boyunca hiçbir gezegenin çarpışmasının ya da fırlatılıp atılmasının olası görünmediği derecede istikrarlı olduğu *gösterilebilir*. En azından beş milyar yıl daha muhtemelen güvendeyiz; bundan sonraysa gökbilimciler güneşin şişerek kızıl bir deve dönüşmesini bekliyorlar ki, bu durumda Mars'ın gezginliği uzak geleceğin Dünyalılarını kaygılandıran son şey olacak.

Neden tüm bu uydular?

Şu ana gelindiğinde, uyduların bir şekilde gezegenleriyle birlikte mi büyüdükleri, yoksa sonradan mı edinildikleri sorusunun kesin bir yanıtının olmaması sizi şaşırtmamalıdır. Açıklanması en kolay olanlar, dev gezegenlerin büyük, düz yörüngeli uydularıdır. Bunların güneş nebulasının minyatür bir versiyonu gibi, büyümesi sırasında her dev gezegeni saran gaz ve toz bulutu içerisinde oluştukları düşünülüyor. Boyutları yalnızca birkaç kilometre ve yörüngeleri dev gezegenlere yakın olan küçük, düz yörüngeli uydular, muhtemelen, çok yaklaşıp parçalanan daha büyük uyduların parçalarıdır. Dev gezegenlerin dış uyduları çoğunlukla ters yörüngelerdedirler ve bunlar, muhtemelen, hayatlarına asteroitler, NÖC'ler ya da kuyrukluyıldız çekirdekleri olarak başlayıp sonradan yakalanmış gökcisimleridir.

Kuramsal olarak, bir gezegenin yoldan geçen bir ziyaretçiyi kendi çevresinde yörüngeye çekmesi neredeyse ola-

naksızdır. Yaklaşan küçük cisim kendi kütleçekiminin etkisiyle gezegenin yanından savrulacaktır, ama yörüngeye hapsedilecek kadar yavaşlatılması kolay değildir. Ancak, ziyaretçi ikili bir nesneyse, momentum aktarımıyla ikiliden biri ötekine yakalanabilir ve bu öteki cisim, karşılaşmadan sonra daha da hızla tabanları yağlayacaktır. Neptün'ün büyük ters uydusu Triton konusunda günümüzde rağbet gören bir kurama göre, Triton bir zamanlar Neptün'e yaklaşmış ikili bir NÖC'nin yarısıydı. Birçok NÖC'nin ikiz gökcisimleri oldukları bilindiğinden, bu açıklama akla yatkın görünüyor. Dikkatinizi çekerim, kuram, neden bu kadar çok NÖC'nin (ve hatta asteroitlerin) uydularının bulunduğu meselesini çözüme kavuşturmuyor.

Dünya'nın Ay'ı için farklı bir açıklama var ve, görünüşe bakılırsa, Dünya'nın büyüdüğü embriyo-embriyo çarpışmaları serisinin en sonuncusunda Dünya çevresinde yörüngeye fırlayan döküntüden oluşup yoğunlaşmış. Mars'ın iki küçük uydusu (Phobos ve Deimos) asteroittir ve yakın dairesel yörüngelere hapsedilmeleri anlaşılabilmiş değildir.

Çarpışmalar ve krater zaman ölçekleri

Büyük gökcisimleri arasındaki çarpışmalar artık aşırı derecede ender olsa da, zaman içerisinde bir gezegenle çarpışabilecek çok sayıda küçük cisim hâlâ var. Yaklaşık 3,9 milyar yıl öncesine dek ("geç ağır bombardıman" denen bir çağ), asteroit ve kuyrukluyıldızların gezegenlere çarpma oranları günümüze kıyasla çok yüksekti. O dönemin çarpma kraterleri günümüzde Ay'da gayet iyi korun-

muş durumdadır (Şekil 2), ancak kraterleşme o zamandan bu yana yavaşlayarak devam etmiştir. Katı bir cisim üzerinde çarpma krateri, bir şeyin saniyede onlarca kilometre hızla ona çarpmasıyla ve çarpma noktasından yayılan şok dalgalarıyla cismin oyulması sonucu oluşur. Çarpan cismin sıyırıp geçecek bir açıyla geldiği ender örnekler hariç, kraterler daire şeklindedir.

Çapa dayalı ve hem deneysel olarak, hem de bilgisayar modelleriyle yeniden üretilebilen, iyi anlaşılmış bir krater morfolojisi hiyerarşisi vardır. Ay'da, mikroskobik boyutla 15 kilometre arasında değişen kraterler basit kâse şeklindedir. 140 kilometreye kadar çaplı kraterlerse derinleşmez, aksine, zeminleri düzdür ve genellikle kraterin oyulmasından hemen sonraki geri tepmenin oluşturduğu merkezi bir doruk noktası vardır. Şekil 2'nin üst kısmının yakınlarında güzel bir örnek bulunmaktadır. Daha büyük kraterlerin bir grup merkez doruğu olabilir ve 350 kilometreden büyük kraterler de iki ya da daha fazla eşmerkezli halka biçimini alır. Bir tipten ötekine geçiş, yüksek kütleçekimli cisimlerde biraz daha küçük çaplarda gerçekleşir.

Kraterleri ortadan kaldıran ya da gömen süreçlerin krater oluşma hızına neredeyse ayak uydurduğu aktif bir gezegen olduğundan, Dünya'nın kraterleşme kaydı iyi korunmamıştır. Şansımıza, Ay'da günümüze kalabilmiş olan devasa eski arazi kesitleri, yaşları bilinen yüzeyler üzerindeki çarpma kraterleri yoğunluğunu hesaplayabilmemizi sağlıyor; Apollo insanlı ay inişi programıyla ve ayrıca örnek getirme amaçlı birkaç insansız Sovyet uçuşuyla Dünya'ya getirilmiş örnekler, bu yüzeylerin yaşını saptamamıza olanak tanıyor. Bu sayede, geç ağır bombardımanın tarihini ve, ayrıca, o



2. Ay'ın bol kraterli bir bölgesinden 470 kilometre genişliğinde bir görüntü. Bu kraterlerin çoğu yaklaşık 3,9 milyar yıl öncesinden kalmadır ve daha eski kraterleri örtmüşlerdir. Her bir krater, kendisinden yaklaşık 20 ya da 30 kat küçük bir cismin çarpmasıyla oluşmuştur. Bir zamanlar Dünya'nın bazı yerleri de böyle görünüyordu.

zamandan bu yana kraterleşmenin Ay'ı ortalama etkileme oranını biliyoruz. Dünya da uydusuyla aynı çarpma seline maruz kalmış olmalı ve bunun Merkür, Venüs ve Mars için de makul bir yaklaşık tahmin olduğuna inanmamız için iyi nedenler var. Dolayısıyla, kraterleri saymak, gezegen yüzeyleri üzerindeki yaşları tahmin etmek için elimizdeki en iyi yol. Mutlak yaş kuşkulu olsa bile, düşük krater yoğunluklu

bir yüzeyin yüksek krater yoğunluklu yüzeyden genç olduğunu varsaymak genellikle emniyetli olacaktır.

Şu anda Dünya'ya her yıl 1 kilogramdan fazla ağırlıkta yaklaşık 10.000 göktaşı çarpıyor, ama bunların çoğu, sürtünme sonucu ısındıkları ve eridikleri atmosfer geçişini atlatamayacak kadar küçük. 1.000 kilogramlık göktaşı akışı yılda yalnızca 10 civarında ve (yaklaşık 2 kilometre uzunluğunda bir krater üretecek) 150 metre çaplı cisimlerin çarpışları arasındaki ortalama süre yaklaşık 5.000 yıl. Yaklaşık 1 kilometre çaplı cisimlerse yaklaşık olarak her 200.000 yılda bir geliyor, atmosferi sanki hiç yokmuşçasına delip geçiyor, hızı kesilmeden yere çarpıyor ve belki 20 kilometrelik bir krater oluşturuyor. Daha büyük ve yıkıcı cisimlerin çarpma sıklığıysa daha da düşük.

Çarpmalar Güneş Sistemi'ndeki her gökcismini etkiler, ama kraterler yalnızca yüzeyin katı ve çarpma izini silecek başka faaliyetlerin yetersiz düzeyde olduğu yerlerde kalır. Gözlemciler, gelgitle yolundan sapmış bir kuyrukluyıldızın bir dizi parçasını Temmuz 1994'te Jüpiter'e çarpmasından hemen önce keşfetme talihine eriştiler. Çarpışmaların birçoğuna tanıklık edildi ve her biri dev gezegenin atmosferinde, tıpkı Temmuz 2009'da bulunan ve gözlenmemiş bir çarpışmada oluşmuş iz gibi haftalarca kalacak, kahverengi bir iz bıraktı.

Yaşam yerleri olarak gezegenler

Dünya Güneş'ten elverişli bir uzaklıkta olmasaydı bu kitabı okuyamazdınız, çünkü yaşam başlamayabilirdi ve,

başlamış olsaydı bile, biz burada gelişemezdik. Bilim insanları, her yıldızın etrafında, bir gezegendeki yüzey sıcaklığının yaşam için çok sıcak da, çok soğuk da olmayacağı uzaklıkta bir "yaşanabilir bölge" olduğunu söylerler. Altın Saçlı Kız'ın (sıcaklığı "tam olarak doğru" olan) ayı yavrusu lapası tercihine benzetme yapılarak, bu yaşanabilir alana bazen "Goldilocks (Altın Saçlı Kız) bölgesi" denir. Bu bağlamda, "yaşanabilir", basit mikroplardan ibaret olsa bile herhangi türde bir yaşamı ayakta tutabilecek bir yer anlamına gelmektedir. Ortamın insanlar açısından yaşanabilir olduğunu ima etmez.

Bizim türümüzdeki yaşam su gerektirdiğinden, yaşanabilir bölge, genellikle, yıldızdan, gezegen sıcaklığının suyun sıvı halde olmasına izin vereceği uzaklıkla özdeşleştirilir. Gezegenin atmosferinin yoğunluğu ve bileşimi yüzey sıcaklığını etkiler, ama başlıca etken yıldızdan alınan ısıdır. Güneş'in etrafındaki yaşanabilir bölgenin yaklaşık 0,95 AB'den yaklaşık 1,5 AB'ye uzandığı tahmin edilmektedir. Bu tahminler Venüs'ü (0,72 AB) yaşanabilir bölgenin iç kenarının çok içerisine, Mars'ıysa (1,52 AB) dış saçağına yerleştirir. Gezegenlerin oluşmasından bu yana Güneş'in çıktısı muhtemelen biraz daha yükselerek zaman içerisinde yaşanabilir bölgeyi dışarıya doğru itmiştir ve bu nedenle Mars yaşam için kötü bir aday gibi görünmektedir, ama umutsuz vaka da değildir.

Gezegen yüzeyi sıcaklığınca belirlenmiş bir yaşanabilir bölge fikri çok sığ olmakla eleştirilmiştir. Yüzey barınılmaz görünse bile, gezegenin içinde üretilen ısının yaşama uygun bir ortam nişi sunabileceği şartlar vardır. Dünyada bile 0^0 C altında ya da 100^0 C üstünde yaşayan "eks-

tremofil" organizmalar biliyoruz. Dolayısıyla, tüm yaşam Dünya'daki gibi karbon molekülleri zincirlerine dayalı ve çözücü olarak suya bağımlı olsaydı bile, Güneş Sistemi'nde var *olabileceği* birçok yer (gerçi yalnızca birinde, Dünya'da var olduğu *bilinmektedir*) ve galaksideki başka yerlerde en azından milyonlarca yaşanabilir yer vardır. Bu temaya kitabın sonlarına doğru döneceğim.

Uzay keşifleri

Teleskoplar, örneğin bir gezegenin yüzey ve atmosfer sıcaklığının ve bileşiminin ölçülmesinde çok işe yararlar. Mars üzerindeki kutup buz takkeleri daha 1781'de William Herschel tarafından doğru olarak saptanmıştır. Jüpiter'in büyüklüğü ve yakınlığı sayesinde, bulutları arasındaki fırtınalar oldukça mütevazı teleskoplarla bile izlenebilmektedir. Ancak, Dünya çıkışlı uzay araştırma araçlarının Güneş Sistemi'ndeki her gezegeni ziyaret ettiği yarım yüzyıllık uzay keşifleri olmasaydı, bu kitap daha yavan ve spekülasyona dayalı olurdu. Sovyet araştırma araçları Ay'a 1959'da ulaştı ve 1969'la 1972 arasında on iki Amerikalı astronot Ay yüzeyinde yürüdü. 1960'larda insansız Amerikan (NASA) ve Sovyet araştırma araçları Venüs ve Mars'ın yakınından geçti ve 1970'lerde yörünge uçuşu ve yumuşak iniş gerçekleştirildi. Jüpiter ve Satürn'ün yakınından ilk 1970'lerde geçildi, öteki dev gezegenlerse 1980'lerde ziyaret edildi. 1990'dan bu yana yerbenzeri gezegenler becerileri giderek gelişen yörünge araçlarıyla incelendi, Mars yüzeyi üzerinde robot gezgin

araçlar dolandı ve hem Jüpiter hem Satürn'ün etrafında karmaşık yörünge turları gerçekleştirilebildi.

En ünlü uzay uçuşları arasında 1976'da Mars'a inen *Viking 1* ve *2*; 1990-4'te radarla Venüs'ün yüzeyinin haritasını çıkaran *Magellan*; 1979'la 1989 arasında dev gezegenlerin yakınından geçen *Voyager 1* ve *2*; 1995'le 2003 arasında Jüpiter'in yörüngesine giren *Galileo* ve 2004'te Satürn'ün yörünge turuna başlayıp 2005'te de Titan yüzeyine *Huygens* adlı bir araştırma aracı gönderen *Cassini* yer alır.

Önümüzdeki yılların dikkat çekecek olayları arasında Mars'tan, asteroitlerden ve kuyrukluyıldızlardan toplanan örneklerin Dünya'ya getirilmesi ve Ay'a yeniden insan indirilmesi yer alıyor. Uzay güçleri artık ABD ve Rusya'yla sınırlı değil. Avrupa Uzay Ajansı tek başına Mars ve Venüs'e, NASA'yla ortak olarak Satürn'e gitti ve yakında Japonya'yla birlikte Merkür'e gidecek. Japonlar Ay'a ve bir asteroide araştırma araçları yolladılar ve Çin'le Hindistan Ay'a ulaştılar. Bilimsel açıdan büyük bir işbirliğine erişildi (ve araştırma araçlarının çoğu farklı ulusların katkısı olan aletler içeriyor), ama hem ulusal gururun, hem de uzun vadeli stratejik ve ticari çıkarların da söz konusu olduğu kuşku götürmez bir gerçek.

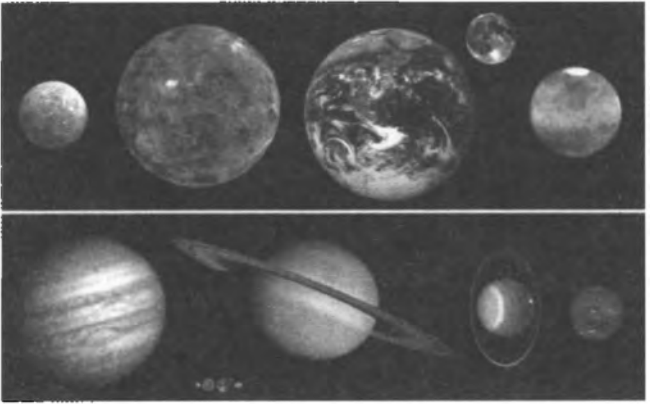
II. Bölüm

KAYAÇ GEZEGENLER

Bu bölümde, üzerinde yaşadığımız gezegeni ve onun gibi öteki gökcisimlerini, yani üç öteki yerbenzeri gezegen Merkür, Venüs ve Mars'ı, bir de Ay'ı tartışacağım. IAU'nun gökbilimcilerine göre Ay yalnızca bir uydu, ama bir jeoloğun ya da jeofizikçinin bakış açısından, bileşimi ve iç yapısı onu yerbenzeri gezegenler arasına yerleştiriyor. Şekil 3'te bu beşi aynı ölçekte incelenmiş ve Tablo 3'te konuyla ilgili bazı veriler sıralanmıştır. Bu gruptan Merkür ve Ay'ın atmosferleri yoktur. Venüs'ün boyutu, kütlesi ve yoğunluğu Dünya'dan biraz düşük, dolayısıyla yüzeyindeki kütleçekimi Dünya'nınkinden yalnızca biraz daha azdır. Ancak, atmosferi önemli düzeyde daha yoğundur. Mars, Merkür'den büyüktür, ama yoğunluğu ondan düşüktür. Bu iki etki birbirini giderdiğinden, yüzey kütleçekimleri birbirine çok benzer, ancak Mars daha soğuk olduğu için ince, ama hatırı sayılır bir atmosfer edinebilmiştir. Aralarında yüzey kütleçekimi en düşük olan Ay'dır –Dünya'nınkinin yaklaşık altıda biri– ve Ay yürüyüşçülerinin öyle tuhaf bir

Tablo 3. Yerbenzeri gezegenler için temel veriler.

	Kütle/10^{24}kg	Kutup çapı/km	Yoğunluk 10^{3} kg m^{-3}	Yüzey kütleçekimi /m s^{-2}	Atmosfer basıncı /bar	Ortalama yüzey sıcaklığı
Merkür	0,330	4880	5,43	3,7	10^{-15}	170 °C
Venüs	4,87	12104	5,20	8,9	92	480 °C
Dünya	5,97	12714	5,51	9,8	1	15 °C
Ay	0,074	3476	3,34	1,6	$2x10^{-14}$	1 °C
Mars	0,642	6750	3,93	3,7	0,0063	-50 °C



3. Yukarıda: soldan sağa Merkür, Venüs, Dünya, Ay ve Mars, aynı ölçekte gösterilmişlerdir. Altta: çok daha büyük olan dev gezegenler Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün; yerbenzeri gezegenler aynı ölçekte eklenmiştir.

biçimde zıplamalarının nedeni de budur. Ortalama yüzey sıcaklıkları, enleme göre ve bazı durumlarda, geceyle gündüz arasında oluşan geniş dalgalanmaları gözden saklar. Örneğin, Merkür'de en yüksek gündüz sıcaklığı 400 ^{0}C'yi aşar, ama uzun bir Merkür gecesinin ardından, şafak vaktinde sıcaklık -180 ^{0}C'nin altına iner.

Çekirdekler

Yerbenzeri gezegenler, büyük oranda silikatlı minerallerden oluşan kayalık dış yüzleriyle ayırt edilir. Ancak, yoğunluklarının yüksekliği düşünüldüğünde, tümüyle kaya-

lık olamazlar ve her birinin merkezinde demir yoğunluklu bir çekirdek olduğuna inanılır. Hiçbir gezegenin çekirdeği doğrudan görülemez ya da çekirdekten örnek alınamaz, ama birbirlerinden bağımsız birçok kanıt hattı bulunmaktadır. Bunlardan biri olan yoğunluk, yüksek basınçtaki iç sıkışma dikkate alındığında bile iç kısmın kayadan daha yoğun olması gerektiğine işaret etmekte ve yörüngeye giren uzay araçlarının izledikleri yola ilişkin analizler, her gezegenin merkezinin çevresinde yoğunluğun simetrik olarak arttığını göstermektedir. Kayaç bir gezegenin içinde neler olabileceğine ilişkin kimyasal modeller, bütün demirin oksitlenip silikatlı minerallerde bağlanması için yeterince oksijen bulunmadığını düşündürmektedir. Dolayısıyla, iç kısım herhangi bir zamanda ergimişse, bu durum, kayadan daha yoğun olan metalik demirin merkeze doğru çökmesine izin verecektir. Bu da ayrımlaşma denen bir sürecin örneğidir.

Dünya ve Merkür'ün demir zengini çekirdeklerinin dış parçaları günümüzde ergimiş olmalıdır, çünkü bu iki gezegenin, görünüşe bakılırsa, elektrik ileten bir akışkanın içindeki dinamo hareketinin ürettiği güçlü manyetik alanları bulunmaktadır. Merkür'ün yoğunluğu böyle küçük bir gezegene göre çok yüksektir, dolayısıyla çekirdeği alışılmadık derecede büyük olmalı, hacminin yaklaşık % 40'ını kaplamalı ve kütlesinin yaklaşık % 75'ini oluşturmalıdır. Venüs, Ay ve Mars'ın içinde manyetik alan üretilmez; dolayısıyla, çekirdekleri muhtemelen tümüyle katıdır.

Dünya örneğine baktığımızda, depremlerin (ya da yeraltı nükleer testlerin!) tetiklediği titreşimler olan sismik dalgaların gezegende ilerleme biçimleri çekirdek hakkında

ek kanıtlar sunar. Bu kanıtlar, 1.215 kilometre yarıçaplı katı iç çekirdek ve 3.470 kilometre yarıçaplı akışkan bir dış çekirdek düşüncesini doğrulamaktadır. Her ikisi de temelde, % 5-% 10 nikelle alaşımlı demir gibi görünmektedir, ama yoğunluk savları, yoğunluğu demirden düşük, iç çekirdeğin % 6-% 10 kadarını ve dış çekirdeğin % 2-% 5'ini oluşturan bir şey de gerektirir. En olası açıklama bir tür oksijen, silikon ve kükürt karışımıdır.

Toplamda, Dünya'nın çekirdeği gezegenin hacminin yaklaşık % 16'sını kaplar. Venüs ve Mars için, büyük oranda ortalama yoğunluklarına dayalı tahminler olan karşılaştırılabilir değerler sırasıyla yaklaşık % 12 ve % 9'dur. Ay'dan (Apollo programıyla) elde edilmiş olan çok kısıtlı bazı sismik veriler, 220'yle 450 kilometre arası yarıçaplı (Ay'ın toplam hacminin % 4'ünden az), görece küçük bir çekirdeğe işaret etmektedir. Yaklaşık olarak her 20 göktaşından biri, % 4,5-% 18 oranında nikel içeren bir demir alaşımından oluşur ve bu da asteroit kuşağına ait, çarpışmalar sonucunda parçalanmadan önce içsel ayrımlaşma geçirmiş gezegenimsilerin çekirdeklerine tekabül eder.

Manto ve kabuklar

Yerbenzeri gezegenlerin çekirdeklerini saran silikat kısma manto denir. Her yerbenzeri gezegenin toplam hacminin ve Merkür hariç hepsinin kütlesinin çoğunu bu manto oluşturur. Kabuk ise mantonun üzerini örten görece küçük bir birimdir. O da silikattan oluşur, ama bileşimi mantodan biraz farklıdır.

Bir gezegenin günümüzdeki mantosu, jeologların "magma okyanusu" olarak bildikleri, son dev cisim çarpmasından sonra küreyi kaplamış olan ergimiş kayadan gelişmiştir. Magma okyanusu soğurken yüzeyi uzaya ısı yaymış olmalıdır ve bu da soğuyarak katı bir zar oluşturmasına yol açar. Ancak, aşağıdaki çalkantı ve yukarıdan gelen çarpma darbeleri nedeniyle, bu zar sürekli kırılıp tekrar geriye çökecektir. Manto okyanusu soğumayı sürdürecektir, ancak bir su topunun donmasının aksine, tamamının katılaşacağı belli bir sıcaklık yoktur. Ergimiş silikatlı maddelerde, çeşitli bileşimlerde mineraller farklı sıcaklık ve basınçlarda kristalleşirler. Gezegen bilimciler magma okyanuslarının tabakalar halinde kristalleşme düzeyinden ya da eriyikten daha yoğun mineraller batarken yoğunluğu daha düşük minerallerin yükselip, belki de birbirlerine tutunarak, yukarıya doğru daha etkili biçimde çıkabilecek devasa "kaya dağları" oluşturup oluşturamadıklarından emin değildirler.

Alttaki magma okyanusundan kimyasal açıdan farklı olan bu yüzer madde kümeleri, Ay üzerindeki en eski gerçek kabuğu oluşturdu; bu kabuk, ay dağları (Ay yüzündeki soluk bölgeler) halinde günümüzde de varlığını korumaktadır. Biraz da sonraki kabukların büyük oranda yerini almış (ya da en azından üzerini örtmüş) olması nedeniyle, daha büyük yerbenzeri gezegenlerde en eski kabuğun yapısı saptanamamıştır. Bunun nasıl olabileceğini görmek için dikkatimizi yeniden mantoya yöneltmeliyiz. Genç bir gezegen soğurken zamanla mantosu tümüyle katılaşır. Silikatlı maddelerin iki başat özelliği bu noktada önem kazanır. Bunlardan ilki yeterince sıcak katıların ne tümüyle hareketsiz, ne de şekli değişmez olmalarıdır. Bir gezegenin

iç kısmındaki sıcak kaya, bir zift blokunun zaman içerisinde biçiminin bozulmasına çok benzer bir biçimde, yılda birkaç santimetre hızla (tırnaklarınızın büyüme hızı) akabilir. Katı bir mantonun içerisindeki hareket, onu ortaya çıkaracak güçler varsa, yavaş ama jeolojik açıdan etkili bir hızda oluşacaktır. Gezegenin içindeki gerekli dürtü ısıdan gelir. Derinlerdeki sıcak manto yukarıdaki daha soğuk mantodan biraz daha düşük yoğunlukta olacaktır ve, bu nedenle, yer değiştirme eğilimi vardır. Bu türde harekete taşınım denir ve ocakta ısıtılan çorba tenceresinde gözleyebileceğiniz şeydir; yalnızca, gezegenin içerisinde çok daha yavaş bir "katı durum taşınımı" söz konusudur.

Yukarıya doğru yükselip daha soğuk mantoyu aşağıya iterek onun yerini alan bir sıcak manto şeridi ya da "sorgucu" düşünün. Yükselen mantonun maruz kaldığı basınç yüzeye yaklaştıkça azalır ve bu da ikinci ilgili özelliği sahneye sokar: Basınç düştükçe silikatlar ergimeye başlarlar. Katının yalnızca bir kısmı ergidiğinden, bu sürece "kısmi ergime" denir ve oluşan magmanın silika düzeyi, içinden çıktığı katıdan biraz daha fazladır. Sonuçta ortaya çıkan magmanın yoğunluğu da katıdan düşüktür; bu nedenle, kaldırma kuvveti, özellikle de üzerindeki kayanın gerilim altında olduğu ya da kırıldığı yollar varsa, onu yukarıya, yüzeye doğru sıkıştırıp iter. Magma yer altında durdurulmadıkça, volkanlar aracılığıyla dışarıya püskürecektir.

Bu şekilde oluşan kaya püskürtü kayaç olarak tanımlanır ve püskürme faaliyeti sonucunda oluşan kabuk, sızma ya da gömme yoluyla, gezegenin ilk kabuğunun yerini alabilir. Ay'ın karanlık parçaları, yani ay "mare"leri, daha soluk ilk kabuğun bu şekilde oluşan lav akışlarının altına

gömülmüş olduğu alçak bölgelerdir. Dünya'nın bugünkü kabuğu, mantonun kısmi olarak ergiyerek okyanus kabuğunu ve kuşaklarca okyanus kabuğunun ergiyip geri dönüşerek kıta kabuğunu oluşturmasının sonucudur. Dünya'nın okyanus kabuğu 6-11 kilometre kalınlığındadır, kıta kabuğuysa ince, uzun bölgelerde yaklaşık 25 kilometreyle büyük sıradağların altında 90 kilometre arasında değişir. Kabuk toplamda Dünya hacminin yalnızca yaklaşık % 1'ini kaplar. Ay'ın kabuğunun kalınlığı ortalama olarak yaklaşık 70 kilometredir (Ay hacminin % 13'ü) ve bazı yüksek bölgelerde 100 kilometre üzeri kalınlıkla bazı önemli çarpma çanakları altında 20 kilometre altı arasında değişir.

Özetle, kabuk alttaki mantoyla kimyasal olarak akrabadır, ama ondan çıkma biçimine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Mantoya kıyasla kabuğun yoğunluğu daha düşük ve ortalama bileşiminde silika daha fazladır. Kabuk mantodan daha fazla çeşitlilik sergiler ve herhangi bir atmosferle ya da sıvı suyla kimyasal tepkimeye girmiş ve parçalanmış veya çözülmüş, (kütleçekimi, rüzgâr, su ya da buz tarafından) taşınmış ve başka bir yere çökmüş kaya içerir. Bu tür çökeltiler tortul kayaları oluşturur. Gömülme, deformasyon ve ısınma, tortul ya da püskürtü kayanın yeniden kristalleşmesine neden olabilir ve, bu durumda, başkalaşmış kaya olarak adlandırılır.

İç ısı

Gezegenlerin içlerinin sıcak olmasının bir nedeni, eklenmelerden kalma ısıdır. Bu "ilksel ısı"nın günümüze

kalmış oranı büyük gezegenlerde daha yüksektir. Bunun nedeni, ısı içeriğinin, yarıçapın küpüne bağlı olan gezegen hacmiyle ilişkili olmasıdır; ısı sızıntısıysa, yarıçapın yalnızca karesine bağlı olan yüzey alanıyla kısıtlıdır.

Isı, ayrıca, radyoaktif izotopların bozunması yoluyla, gezegenin içinde de üretilir. Bu izotopların sayısı çoktur, ama yalnızca dördünün bozunumu anlamlı düzeyde ısınmaya neden olur: potasyum-40, uranyum-238, uranyum-235 ve toryum-232. Jeokimyasal yakınlıkları nedeniyle, bu elementler, mantoya kıyasla kabuk kayalarında daha fazla bulunur. Dünya'da, kabukta radyojenik olarak (yani radyoaktif bozunma yoluyla) üretilen ısının miktarı, hacimsel olarak çok daha fazla yer kaplayan mantonun tamamında üretilenle yaklaşık olarak aynı miktardadır.

Yerbenzeri bir gezegenin toplam ısı üreten element içeriği kütlesine (ve dolayısıyla hacmine) bağlıdır. Tıpkı ilksel ısı gibi radyojenik ısı da büyük gezegenlerde daha etkin biçimde korunur. Dünya örneğine bakıldığında, günümüzde yüzeye sızan ısının yaklaşık yarısı ilksel ve geriye kalanın neredeyse tamamı da radyojenik ısıdır.

Litosferler

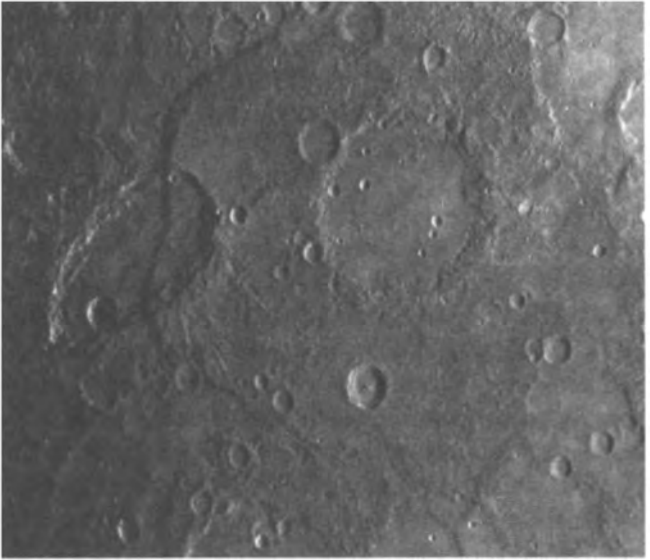
Özelliklerde soğuk ve sertten sıcak ve taşınımlıya geçiş, genellikle, kabukla manto arasındaki sınırın altında yer alan bir derinlikte gerçekleşir. Bu nedenle, kabuk ve en üstteki manto tek bir mekanik katman oluşturarak sert bir dış kaplama yaratır. Gündelik kayanın mekanik özelliklerini sergilediğine işaret etmek için bu kaplamaya Yu-

nanca *lithos* ("kaya") sözcüğü kullanılarak "litosfer" denir. Mantonun, bileşiminin kayaç olmasına karşın ısı yayacak kadar sıcak ve zayıf olduğu yer, litosferin altıdır. Bu bölgeye bazen ("güçsüz" anlamındaki Yunanca a-*sthenos* kullanılarak) astenosfer de denir.

Dünya'nın litosferi yaklaşık 100 kilometre kalınlığındadır ve alttaki astenosferin özel zayıflığı nedeniyle yer değiştirebilen bir dizi levhaya bölünmüştür. "Levha tektoniği" olarak bilinen bir sürecin parçası olarak, okyanus zeminindeki yarıklar halinde gördüğümüz dalma bölgelerinde levhalar (genellikle okyanusların altında, gözlerden saklanmış olarak) birbirlerinden ayrıldığında yeni litosfer yaratılır ve bir levha ötekinin altına çekildiğindeyse litosfer yok olur. Depremlerin çoğunun nedeni, bir levhanın komşusunu sıkıştırmasıdır. Biri size Dünya'nın levhalarının "manto üzerinde kayan kabuk" olduğunu söylüyorsa, yanılıyor ve pek çok ders kitabında ve sınav programında karşımıza çıkan, ısrarlı bir safsatayı yineliyordur. Gerçek şu ki, levha, kabuğu ve ona birleşik en üst sert mantoyu içerir ve bunlar daha derindeki, daha yumuşak astenosfer mantosu boyunca birlikte kayarlar.

Kırılgan olan litosfer, bir kaya kütlesi ötekini sıkıştırdığında fayların oluşabildiği katmandır. Dünya'da, özellikle iki levhanın buluştuğu bölgelerde faylara sık rastlanır ve başka gezegenlerde de saptanmışlardır (Şekil 4).

Levha tektoniği Dünya'ya özgü görünmektedir. Merkür, Ay ve Mars'ın çok daha kolayca soğuyan küçük gövdelerindeki litosferin daha kalın olması kuşkusuz bunda etkilidir, ama levhaların hareketli olması için astenosferin tepesinin özellikle zayıf olmasının gerekmesi daha önem-



4. Merkür'ün bir bölümünün 500 kilometre genişliğinde görüntüsü. Güneş'in ışığı sağdan gelmektedir. Gölge, bir kilometre yüksekliğindeki bir yamacı kenarındaki açık bir M harfiyle ortaya çıkarmaktadır. Beagle Rupes adındaki bu eski bindirme fayı, sağdaki (doğu) arazinin soldaki (batı) arazi üzerinden batıya doğru itildiği yeri işaretler. Kraterlerin bazıları bu faydan yaşlı, bazılarıysa gençtir.

li bir etmendir. Dünya içinde, bu, kaya içindeki, onu zayıflatan ve gren sınırlarını kayganlaştıracak az miktarda eriyik oluşumunu teşvik eden az miktarda su sayesinde gerçekleşir. Venüs suyunu yitirmiş olduğundan astenosferi kurudur ve litosfer levhaları astenosfer üzerinde serbestçe kayamazlar.

Kuru ya da çok derin bir gezegen astenosferi, temelde, yüzeydeki iki etkisiyle gözler önüne serilir. Bunlardan biri dağların yüksekliği ve çanakların derinliğidir. Bu yükseklik ve derinlikler çok fazlaysa, astenosfer akıp üzerindeki litosferi esnetir ve böylece topografik kontrastı yalnızca litosferin gücüyle desteklenebilecek derecede azaltır. İkincisiyse büyük çarpma darbelerinin neden olduğu kırılma örüntüsüdür. Onlarca kilometrelik çapta bir cisim, oluşturacağı krater yaratan şok dalgalarının litosferi dağıtacağı bir hızla gelir ve krater de eşmerkezli kırık halkaları içeren bir çanak biçimini alır. Daha ince bir litosferde halkalar genellikle birbirlerine daha yakın olduğundan, bu çok halkalı çarpma çanakları, oluşum zamanlarındaki astenosferin derinliğinin tahmininde kullanılabilir. Gezegen yavaş yavaş soğudukça, litosferi giderek kalınlaşır.

Volkanik faaliyetler

Ergimiş kayaya püskürmesinden önce verilen adla magma, gezegenin içinde temelde üç nedenden ötürü oluşabilir. Doğrudan ısıya maruz kalmak bunlardan yalnızca biri ve genellikle en önemsizidir: bazı geniş çaplı volkanik faaliyet vakalarının nedeni, gezegenin litosferinin altında sıkışmış ısının yavaş yavaş artması olabilir ve gezegenin gövdesi içindeki, fazlasıyla değişkenlik gösteren gelgit baskıları iç sürtünmeye karşı çalışarak "gelgit ısınması"na yol açar. Ya da mantodaki yükselen bir bölgede görülen basınç azalması kısmi ergimeye neden olabilir (örneğin, Dünya'nın okyanus kabuğunun oluşumuna yol açabilir).

Ayrıca, büyük bir çarpma çanağının açıldığı yerin altında olmasının bekleneceği üzere, basınçtaki *ani* bir düşüş de ergime olayını tetikleyebilir. Üçüncü mekanizmaysa mantoya ya da alt kabuğa su girişidir. Su, silikatların ergimeye başladıkları sıcaklığı düşürür. Dalma levhasının kayalarının içine giren su yukarıya, kuşatıcı levhanın tabanının içine kaçtığından, Dünya'da dalma bölgelerinin üzerinde volkan zincirleri vardır. Buradaki şartlar kuruyken ergime için yeterince sıcak değildir, ama sıcaklıkta hiçbir yükselme olmamasına rağmen, su girdiği anda kısmi ergime başlayacaktır.

Ay

İnsanlar Ay'daki volkanik faaliyetler hakkında spekülasyonda bulunmaya, neredeyse teleskoplarla kraterleri gördükleri andan itibaren başlamışlardır. Yanlış yoldaydılar, çünkü, şimdi oldukça emin olduğumuz üzere, Ay'daki kraterlerin neredeyse tamamı çarpma sonucu oluşmuştur. Aslına bakılırsa, Ay'ın başlıca volkanik bölgeleri, bir zamanlar kurumuş deniz yatakları oldukları sanılan koyu renkli kesitlerdir. Bu sanı doğru değildir, ama bunlar hâlâ Latince "deniz" anlamına gelen "mare" adını taşırlar. Çoğulu "maria"dır. Ay yüzeyinin yaklaşık % 17'sini kaplarlar ve çoğu, sürekli Dünya'ya dönük yarıküre olan, yakın taraftadır. Burada, dünyadaki bazalta benzer bileşikteki lav, başlıca çok halkalı çarpma çanaklarını basmıştır.

"Mare" bazaltlarının tam olarak hangi volkan ağızlarından püskürmüş olduğunun saptanması güçtür (Şekil 5).

Konik volkan biçimini almadıkları açıktır. Büyük olasılıkla, akkor ergimiş lav fıskiyelerinin genleşen volkanik gazın gücüyle bir kilometreyi çok aşan yüksekliklere fırlatıldığı çatlaklardı. Lav yere düştüğünde hâlâ yayılacak kadar sıcaktı ve yüzlerce kilometre aşağı aktı. Püskürme düzeyleri düştükçe, çatlak ağızlarının çoğu kendilerini mühürlediler ya da sonraki püskürtüler nedeniyle gömüldüler.

Altı Apollo Ay inişinden (1969-1972) dördü, daha düz oldukları için iniş açısından dağlara göre daha emniyetli olan "mare"lere yapıldı. İncelenmek üzere getirilen "mare" bazalt örnekleri, içerdikleri radyoaktif bozunma ürünlerinin ölçülmesi (radyometrik tarihlendirme) yoluyla, yüksek bir doğruluk oranıyla tarihlendirilebilmektedir ve Apollo örnekleri 3,9 ila 3,1 milyar yıl arası bir "mare" yaşı aralığı sergiler. Bu uzun volkanik faaliyet süresi, mare'ler için getirilen, volkan faaliyetlerinin çanak oluşturan çarpmaların doğrudan ürünü olduğu yönündeki, en basit açıklamayı altüst etti. Üstelik, 2000 yılından bu yana sürdürülen çalışmalarda bulunan bazı mare kesitlerinin üzerlerindeki, sonradan oluşmuş çarpma krateri sayısının azlığı, 1,2 milyar yıldan genç olmaları gerektiğine işaret ediyordu. Bunun aksine, 2007'de Dünya'da göktaşı olarak bulunan (daha önceden, bir çarpma kraterinden püskürük olarak Ay'dan dışarı atılmış) bir ay maddesi parçasının 4,35 milyar yıla, yani son ağır bombardımanın bitişinden yarım milyar yıl öncesine tarihlenmiş bazalt parçaları içerdiği görüldü. Bu kadar yüksek yaştaki hiçbir mare görünür halde kalmamış, sonraki çanak oluşturan çarpmaların püskürüklerinin altına gömülmüştür. Bu nedenle, ayda volkanik faaliyetlerin erken başlayıp geç bittiğini artık biliyoruz.



5. Mare Imbrium'un güneydoğu kenarının 200 kilometre genişliğinde bir görüntüsü. Sağdaki engebeli arazi, çanak ağzının bir bölümünde yükselmiş dağlık kabuktur. Sol yukarıdaki daha koyu renkli ve düzgün alan, alçak zemini basmış olan mare bazaltlarıdır. Görüntünün orta kesimi boyunca, güneyden kuzeye doğru kıvrılarak uzanan 1 kilometre genişliğindeki Hadley Rille adlı hendeğin, gölgenin büyük oranda gözden sakladığı bir kaynaktan lavın aktığı yol olduğuna inanılmaktadır. *Apollo 15*, Hadley Rille yakınlarına, bu görüntünün ortasına yakın bir yere inmişti.

Merkür Ay'a oranla çok daha az bilinir. NASA'nın *Mariner 10*'u 1974-75'te gezegenin yarısından az bir bölümünü görüntülemiş ve, bundan sonra, 2008'de NASA'nın MESSENGER araştırma aracı bir dizi yakın uçuşa başlayana dek, gezegen yeniden ziyaret edilmemiştir. Bu yakın uçuş, Merkür'deki volkanik faaliyetin boyutu konusunda çoğu kuşkuları giderecek kadar ayrıntıyı ortaya çıkarmıştır. Örneğin, Şekil 4'te, sağ alttaki, merkezin sağının hemen yukarısındaki 120 kilometre çaplı çanağı dolduran düz arazi şu anda volkanik olarak kabul edilmektedir. Merkür'de daha soluk dağlarla koyu renk lavlar arasında, Ay'da mare'lerin kolayca görülmesini sağlayan albedo (yansıyan parlaklık) tezadının olmaması önceki kuşkuları güçlendirmişti. Görünüşe bakılırsa, bunun nedeni, Merkür'ün lavlarını oluşturan minerallerin ay (ve yer) bazaltlarındaki tipik düzeye kıyasla çok daha az demir içermesidir. Lavın oluşturduğu düzlükler, muhtemelen, Merkür yüzeyinin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bazıları geç ağır bombardıman çağına tarihlendirilebilecek kadar yaşlıdır ve krater oluşumu yoğundur, ötekilerse daha gençtir ve üzerlerinde daha az krater oluşmuştur.

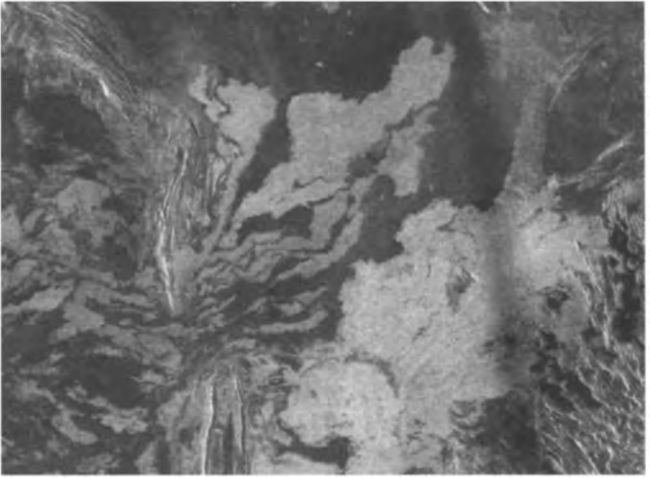
MESSENGER birkaç volkan ağzı ve, ayrıca, son derece genç patlayıcı püskürme bölgeleri olabilecek 10 kilometrelik ilgi çekici –bazıları parlak, bazıları karanlık– lekeler görüntüledi. Merkür'de volkan faaliyetlerinin ne kadar bir zaman devam ettiği, büyük olasılıkla, bir uzay aracı Merkür yörüngesine girip sistematik ve daha ayrıntılı görüntüler kaydedebilene dek bilinemeyecek. İlk fırsatı

2011'de, MESSENGER görevinin yörünge evresine başladığında bulacağız ve mesele o zaman çözümlenmezse, Avrupa Uzay Ajansı'nın Merkür'e 2020'de ulaşması beklenen BepiColombo uçuşuyla çözümlenmeli. Şimdilik, geniş lav alanlarının en azından dört ila üç milyar yıl öncesi arasını kapsayan ve belki de son bir milyar yıla uzanan bir dönem boyunca yerleştiğini söylemek emniyetli olacaktır. Merkür için böylesine uzun bir volkanik faaliyet dönemi tahmin edilmemişti ve bu durum, çekirdeğinin bir kısmını ergimiş halde tutan aynı gizemli ısı kaynağının bir sonucu olabilir.

Venüs

Venüs, Merkür'den çok daha büyüktür. Boyutu ve kütlesi neredeyse Dünya'daki kadar radyojenik ısı üretimine ve, dolayısıyla, benzer bir volkanik faaliyete işaret eder. Ancak, Venüs'te levha tektoniği olmadığından, volkanik faaliyet az çok farklı işler.

Venüs'ün, radarla incelenmesi mümkün olana dek yüzeyini gözlerden tümüyle saklamış olan yoğun, sürekli bulutlu bir atmosferi vardır. Şekil 6'da Venüs'ün bir bölümünün, 1990-1994 arasında gezegenin neredeyse tamamının haritasını çıkaran NASA'nın *Magellan* araştırma aracı tarafından elde edilmiş radar görüntüsü verilmiştir. Radar görüntüleri, yüzeye ışınlanan sürekli bir radar vurumları dizisine karşılık olarak seken yankıların karmaşık analiziyle derlenir. Çoğu amaç için radar görüntülerini, benzedikleri siyah-beyaz optik görüntüler gibi ele alabilirsiniz, ancak,



6. Venüs'ün bir kısmının 500 kilometre genişliğindeki *Magellan* görüntüsü. Alan çoğunlukla lavdır ve görüntünün 300 kilometre batısındaki bir kaynaktan beslenir, ama güneydoğu köşede, Venüs'te varlığını koruyabilmiş en eski kabuğu temsil eden bazı engebeli araziler vardır. Görüntünün batı tarafında, kuzeyden güneye doğru uzanan, lav akışlarıyla yarılmış, çıkıntılı ve kırık araziden oluşma bir dağ kuşağı vardır.

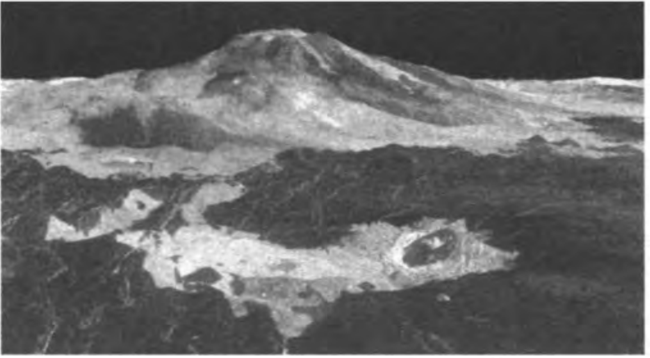
aslında her şeklin parlaklığını, temelde, görünür ışıktaki albedosundan çok, yerel yüzeyin engebe düzeyi belirler.

Şekil 6, Venüs'ün büyük bölümüne tipik örnektir. Görüntü boyunca batıdan doğuya akan –bazıları daha engebeli (daha parlak) ve bazıları daha düz (daha koyu)– sayısız bireysel lav akışını göstermektedir. Bireysel akışların yumrulu örüntüsü, Dünya ve Mars'taki lav akışlarına çok

benzer, ama çarpmaların akış kenarlarını bozduğu Ay ve Merkür'de ayırt edilmeleri zordur.

Venüs'te yüzeyin yaklaşık yarısını kaplayan lav akışlarının yanı sıra, açıkça saptanabilen birçok volkan da bulunmaktadır. Şekil 7'de bu örneklerden biri verilmiştir. Arka plandaki, 5 kilometre yüksekliğindeki, düşük yamaç eğimli volkan, bazaltın tek bir ağızdan tekrar tekrar püskürmesi sonucunda oluşan ve Dünya'da "kalkan volkan" olarak bilinen türdedir. Yamaçlarında bazı bireysel lav akışları seçilebilmektedir. Bu volkanın ve ona benzer başkalarının en son ne kadar zaman önce püskürdüklerinden kimse emin değil. Bazı ilgi çekici ipuçları var, ama bu tür volkanların yakın tarihli ya da günümüzdeki faaliyetlerine ilişkin hiçbir kanıt bulunmuyor ve güvenilir krater sayma istatistikleri için biraz küçükler. Bu volkan, üzerindeki çok sayıda kırık hariç daha düz olan eski bir arazi birimi üzerinde oluşmuş. Ön plandaki çarpma krateri, hemen solundaki parlak lav akışıyla muhtemelen bağlantısızdır.

"Ayla" adı verilen ve Venüs'te 300'den fazlası saptanmış olan dairesel ya da eliptik eşmerkezli kırık örüntülerinin, Ay ve Merkür'ün çok halkalı çarpma çanaklarıyla ortak bir kökeni paylaştığı düşünülmüyor. 200 metreyle 2.000 kilometre üstü uzunlukta olabiliyor ve genellikle bir tür volkan faaliyetiyle ilişkilendiriliyorlar. Her ayla, muhtemelen, astenosfer kabuğundaki yukarı doğru yükselmiş bir sorgucun litosferin tabanını etkilediği bir yeri temsil ediyor. Sorgucun hâlâ mevcut olduğu aylalar çok geniş kubbeler halinde yukarı kalkıktır, ama artık bir sorguç mantosunun desteklemediği eskiler çökmüştür. Özellikle de bu çökme eşmerkezli kırıkları açıklar.



7. Venüs'teki Maat Mons Volkanı'nı gösteren, bilgisayar üretimi, üç boyutlu perspektif görüntüsü. Radar altimetresiyle elde edilmiş bir topografya modelinin üzerine radar görüntüsü oturtularak oluşturulmuştur. Dikey ölçek on kat büyütülmüştür. Her iki veri kümesi de *Magellan* yörünge aracı tarafından toplanmıştır. Sağ ön plandaki çarpma krateri 23 kilometre uzunluktadır.

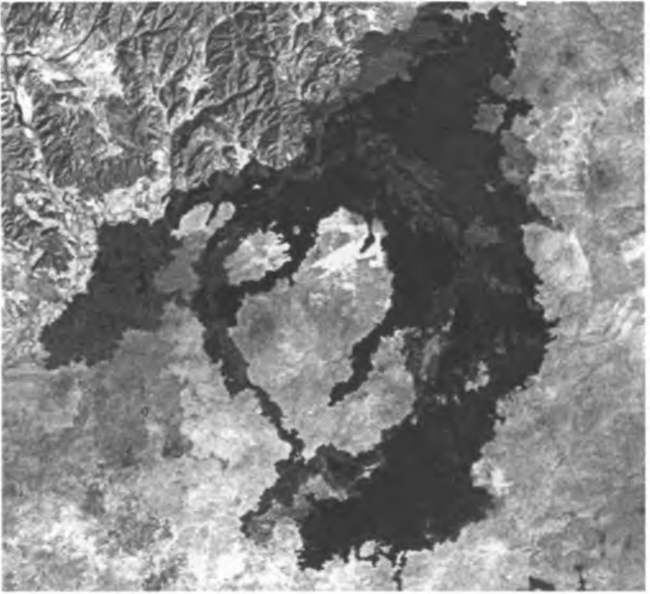
Venüs'te çarpma kraterlerine Dünya'ya göre daha sık rastlanır, ama Ay ve Merkür'e göre sayıları önemli oranda düşüktür (Şekil 6'da hiçbir çarpma kraterine rastlamayacaksınız). Burada etkili olan iki etmen var. 3 kilometrenin altındaki uzunlukta kraterlere Venüs'te hiç rastlanmaz, çünkü yoğun atmosferi yüzeyi küçük cisimlerden korur. Ama atmosferden etkilenmeyecek kadar çok enerji taşıyan nesneler daha büyük kraterler oluşturmuştur. Sayılarının çok yüksek olmaması, ortalama 500 milyonla 700 milyon yıl arasında hesaplanan yüzeyin gençliğiyle açıklanmalıdır. Küresel ortalamadan çok daha yaşlı ya da çok daha genç görünen büyük arazi kesitleri yoktur. 1990'larda bu konu-

da getirilen standart açıklama, bütün gezegen yüzeyinin 500-700 milyon yıl önce başlayan ve birkaç on milyon yıldan fazla sürmeyen bir volkan faaliyeti cümbüşünde değiştiğidir. Bu açıklama, Venüs'ün levha tektoniğinin olmamasıyla uyumludur; bu noksanlık nedeniyle, derin mantodaki ısının çoğu, en üstteki astenosfer ergiyene dek litosfer kapağı altında sıkışmaktadır. Soğuk, yoğun litosfer zamanla çökecek ve alttaki yüzer magma püskürecektir. Venüs'ün oluşumundan bu yana benzer bir şey yarım düzine kez gerçekleşmiş olabilir ve önümüzdeki 100 milyon yıl içerisinde de yeniden gerçekleşebilir.

Felaket düzeyinde küresel volkanik faaliyet gerektiren bu model, yakın zamanlarda, kraterleşme istatistiklerinin daha aşamalı bir süreç olasılığını ortadan kaldırmadığı gerekçesiyle sorgulanmıştır. Son yarım milyar yıl boyunca, rasgele aralıklarla, lavlar giderek küçülen alanları yüzeye çıkarmış olabilir.

Dünya

Dünya'da volkanik faaliyet ve levha tektoniği birleşerek iç ısı bütçesini düzenler ve, böylece, Venüs için kabul edilen türde büyük astenosfer sıcaklığı düzensizliklerini engeller. Litosferin altında üretilen ısının yalnızca yaklaşık üçte biri ısı iletimi yoluyla dışarı sızar. Isının çoğu okyanus ortasında bulunan (birbirlerinden ayrılan levhalara yeni maddelerin eklendiği) yükseltilerdeki püskürmeyle ve daha küçük ölçekte, dalma bölgelerinin üzerinde bulunan volkanlardaki ve manto sorguçlarının



8. ABD'nin Idaho eyaletindeki "Ay Kraterleri" lav tarlasının uzaydan çekilmiş 70 kilometre genişliğindeki görüntüsü. Akışların kaynağı, kuzeybatıdaki engebeli dağların kenarının yakınındaki bir dizi çatlaktı. Lav akışlarının yumrulu formunu Şekil 6'daki Venüs akışlarıyla karşılaştırın.

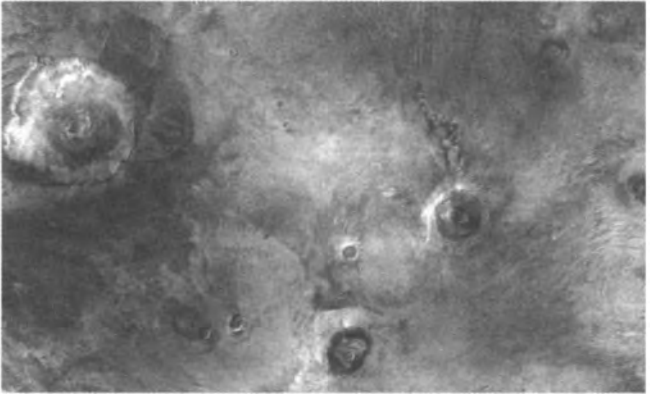
üzerindeki çeşitli "sıcak noktalarda" meydana gelen püskürmelerle litosferin tepesine iletilir. Astenosfer, dalma bölgelerinde litosfer levhalarının eski, soğuk kısımlarının eklenmesiyle soğur.

Venüs benzeri volkanik felaketlere en çok, her birkaç on milyon yılda bir, belki bin kilometre uzunluğunda bir

bölge on kilometreküpe varan bazalt lav püskürüğü altına gömüldüğünde yaklaşırız. Buna "taşkın bazalt" denir. En iyi bilinen örnekler arasında Kuzeybatı Hindistan'daki "Dekkan Tuzakları" (66 milyon yıl), Britanya-Kuzey Kutup bölgesi taşkın bazaltları (Grönland ve Kuzeybatı Britanya Adaları, 57 milyon yıl) ve Columbia Nehri taşkın bazaltları (Kuzeybatı ABD, 16 milyon yıl) yer alır. Bu büyük, ama ender görülen olaylarda atmosfere küresel iklimi etkileyebilecek düzeyde volkanik gaz, özellikle kükürtdioksit, ayrıca "kül" olarak bilinen ince volkan kayası parçacıkları fışkırabilir. Şekil 8'de, öteki gezegenlerden alınan görüntülerle kıyaslamak amacıyla, Dünya'daki lav akışlarına bir örnek verilmiştir.

Dünya'daki volkanik faaliyetlerin öteki gezegenlerdekinden muhtemelen en büyük farkı, yükselen magma içerisindeki gazın genleşmesinin genellikle püskürmelerin önemli bir kısmına patlayıcı bir yapı katmasıdır. Bunun iki nedeni vardır. İlk neden, dalma bölgelerinin üzerinde yukarıya doğru kaçan geri dönüşmüş su, karbondioksit ve kükürtdioksitin daha derinlerdeki ilksel gaz sızıntısına büyük eklemede bulunması ve, bu nedenle, Dünya'da püskürmelerin patlayıcı yapıda olmasına yol açacak mevcut gazın daha fazla olmasıdır. İkincisiyse kıta kabuğunun varlığının, silika içeriği bazalttan yüksek magma üretimini kolaylaştırmasıdır. Silika zengini bu magmalar bazalttan daha yoğun oldukları için daha kolay parçalanırlar. Japonya'daki Fuji Dağı gibi klasik, "resim gibi" konik volkanlara Dünya dışında ender rastlanır, çünkü görece silika zengini ve kısmen patlayıcı püskürmelere işaret ederler.

Dünya ve Venüs'e kıyasla Mars'ta görece daha az volkan vardır. Ancak, boyutlarının büyüklüğü, sayılarının azlığını telafi eder. Büyük bazalt kalkan biçimli volkanların önemli gruplarına (büyük bölümü Şekil 9'da yer alınış olan) Tharsis bölgesinde ve Elysium bölgesinde rastlanır. Tharsis'teki en büyük volkan olan Olympus Mons, tabanında 600 kilometre uzunluğunda ve tepeden dibe 24 kilometreye ulaşan ölçüleriyle, tüm Güneş Sistemi'nin en büyük volkanıdır. Mars'ta bu denli büyük volkanların bulunmasının iki nedeni vardır. İlki, Mars'ın "tek levha

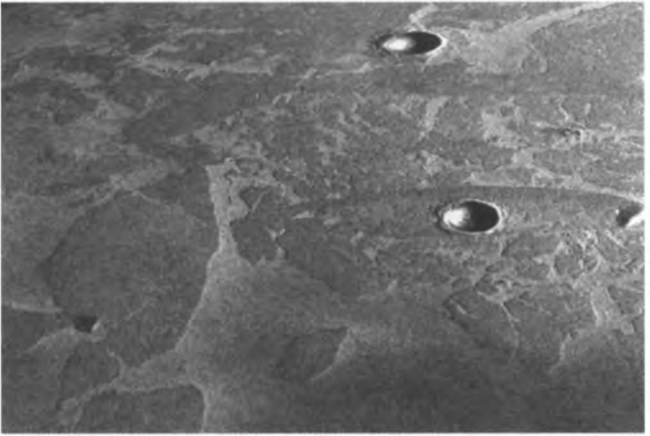


9. Mars'taki birçok muazzam kalkan biçimli volkanı gösteren, 3.000 kilometre genişliğinde görüntüler mozaiği. Solda, Güneş Sistemi'nin en büyük volkanı olan Olympus Mons yer almaktadır. Sağ kenarda Tharsis Tholus yer alır ve güney kenarın ortasından kuzeydoğuya doğru üçlü bir hat uzanır: Pavonis Mons, Ascraeus Mons ve Ceraunius Tholus.

gezegeni" olmasıdır. Litosferi, alttaki manto astenosferine göre fiilen sabit olan, tek parça bir kaplama (tek bir levha) halindedir. Levhaların manto sorguçlarına göre etrafa sürüklendiği ve bu nedenle sorguçla beslenen volkanların yalnızca birkaç milyon yıldan sonra taşınıp magma kaynaklarıyla bağlarının kesildiği Dünya'nın aksine, Mars'taki bir manto sorgucu aktif kaldığı sürece litosferdeki aynı noktaya magma sağlar. Olympus Mons'un oluşumu bir milyar yıldan fazla bir süre önce başlamış olabilir. Günümüzde, yalnızca yüzeyde açıkta olanları (krater sayarak) tarihlendirebildiğimizden ve yapının daha eski ve gömülü iç kısmını göremediğimizden, bunu bilmemizin yolu yok. Zirvesinde, zeminleri 100-200 milyon yıl civarına tarihlenen, üst üste binmiş birçok kaldera vardır, ama yamaçlardaki en genç lav akışları yalnızca iki milyon yıllık gibi görünmektedir ve Olympus Mons'un günün birinde yeniden püskürmesi olasıdır. Tharsis bölgesindeki öteki volkanlar kesinlikle daha eskidir ve artık muhtemelen sönmüşlerdir.

Mars'ın bu kadar büyük volkanlarının olmasının ikinci nedenine gelince: "çünkü, bunu yapabiliyor". Dünya'nınkinin neredeyse iki kat kalınlığında, soğuk, güçlü bir litosferi vardır. Olympus Mons'u Dünya'ya ya da Venüs'e nakledebilseydiniz, görece ince litosferleri bu yükün altında çöker ve volkan yüksekliğini kaybederdi.

Yüksek çözünürlüklü görüntüler, büyük volkanlarla Mars'ın çeşitli öteki bölgeleri arasındaki düzlükler üzerindeki lav akışlarının ayrıntılarını gözler önüne sermektedir. Ancak, bazılarının volkanik saydıkları ve önemli düzeyde tartışma yaratmış yüzey özellikleri de vardır. Şekil 10'da dikkate değer bir örnek verilmiştir.



10. Mars'taki tartışmalı bir alanın, ESA'nın *Mars Express* yörünge aracı tarafından elde edilmiş, 50 kilometre genişliğindeki görüntüsü. Katmanlı yüzeyin, kabuğu kırıklı ve soğumakta olan bir lav akışı olduğunu söyleyenler var. Kimileriyse bunu donmuş bir denizin yüzeyindeki (şimdi tozla kaplı olan) kırık yığın buz olarak görürler. İki çarpma krateri katmanlı yüzeyden daha yaşlıdır ve kenarları, iç kısımlarının taşkına uğramasını engelleyecek yükseklikteydi. Kraterler aslında daireseldir, ama bu eğik görüntüde uzayıp incelmiş görünüyorlar.

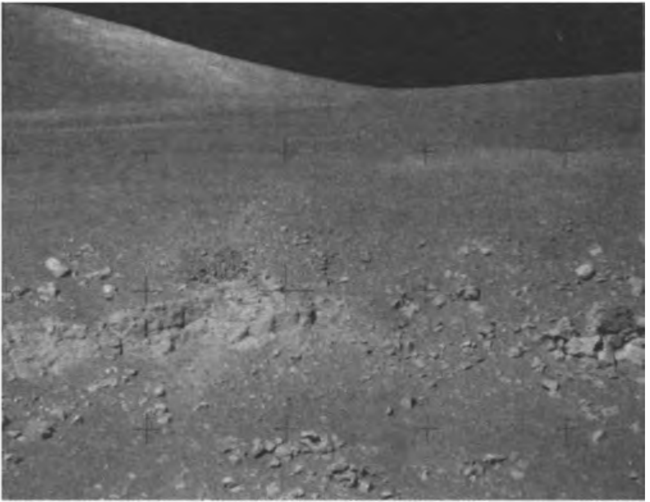
Dünya'da göktaşı olarak Mars'tan gelmiş 30'dan fazla çarpma püskürüğü parçacığı toplanmıştır. Hepsi ya bazalt lav ya da daha kaba, kristalli eşdeğerleridir ve kristalleşme yaşları 4,5 milyar yılla 160 milyon yıl gibi genç bir yaş arasında değişir. Yüzeyin geniş kesitlerinin çeşitli türlerde bir tortu kaplamasının olmasına rağmen, derinlerde Mars kabuğunun büyük bölümünün püskürük kayaçtan oluştuğu sonucunu çıkarabiliriz.

Yüzey süreçleri

Regolit ve aşınma

Volkanik faaliyetin itici gücü gezegenin içinden gelir, ama temelde yüzeyde oluşan süreçler de gezegen manzaralarını aynı derecede şekillendirebilir. Havasız, dolayısıyla uzaya karşı korunaksız bir gökcisminde yüzeye doğrudan etki eden, açık arayla en baskın süreç, göktaşı ve mikrogöktaşı bombardımanıdır. Kraterlerden fışkıran parçalanmış maddeler ("püskürük") yüzeyi metrelerce kalınlıkta bir battaniye gibi sarar ve yüzey alanında katı anakayanın görüldüğü yerler enderdir (Şekil 11). Apollo astronotlarının ayak izlerini bıraktıkları, "regolit" olarak bilinen ay toprağı, kristal parçacıkları, küçük kaya kırıntıları ve çarpma ısısıyla üretilmiş donmuş eriyik damlacıkları olan camsı kürecikler içeren, çoğunlukla bir milimetrenin küçük bir kesimi kadar boyutta taneciklerden oluşur. "Çarpma peyzajı" olarak bilinen süreçte, kraterlerin açılması ve püskürük dağılmasıyla, regolit sürekli olarak ve çeşitli ölçeklerde yeniden düzenlenir. Çarpma hızlarının daha yüksek olduğu Merkür'de regolit taneciği boyutunun ay regolitindekinin yaklaşık üçte biri kadar olması beklenmektedir.

Atmosfer olmadığında güneşin ultraviyole ışığı yüzeye ulaşabilir ve burada kimyasal bağları çözebilir. Mikro-göktaşı çarpmaları ve (manyetik alan yoksa) güneş rüzgârının yüklü parçacıkları da yüzey kimyasını etkileyebilir ve havasız gökcisimleri, böylece, toplu olarak "uzay aşınması" denen ve yüzey bileşimini yavaş yavaş değiştiren bir süreçler dizisinden geçerler. Örneğin, demiri oksijen atomları-



11. Apollo astronotu Dave Scott'ın çektiği, Hadley Rille boyunca telefoto görüntüsü. Soldan itibaren uzanan 2 metre kalınlığındaki yatay katman ender bir anakaya örneğidir (muhtemelen bir lav akışı) ve burada dik bir yamaçta, açıktadır. Başka her yer, boyutu iri kayayla toz arasında değişen regolitle kaplıdır.

na bağlayan bağlar çözülebilir ve oksijen kaçarak ardında "nanofaz demir" denen, mikroskopla görülemeyecek kadar küçük saf metal tanecikleri bırakabilir.

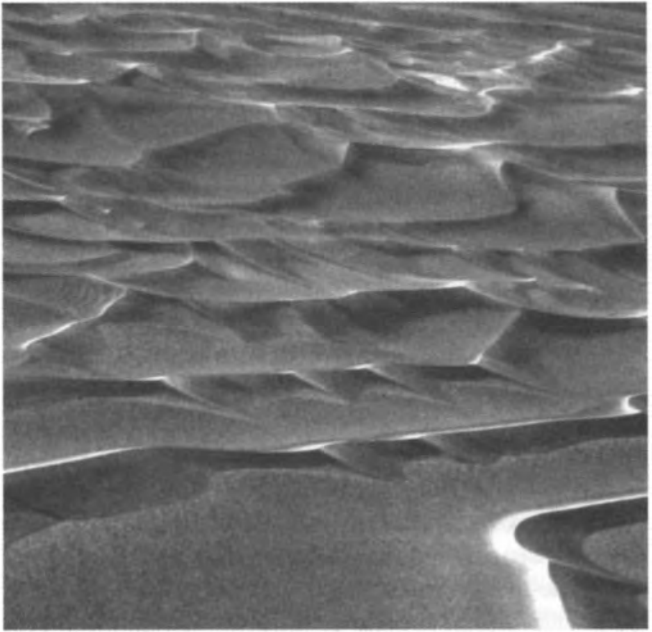
Gezegenin atmosferi varsa, yalnızca en büyük ve ender rastlanan cisimler yüzeye yüksek hızla ulaşabilir. Örneğin, Dünya'nın atmosferinde boyutları 150 metrenin altındaki taş asteroitler büyük olasılıkla küçülür. Geriye kalan parçacıklar sürtünmeyle yavaşlatılabilecek kadar küçük olduğundan, yere ulaştıklarında ilk baştaki ivmelerini ne-

redeyse tümden yitirmiş olur ve krater oluşturamazlar. Çoğunlukla mikro-göktaşları, ama aynı zamanda daha büyük göktaşlarından sürtünmeyle kopmuş parçacıklar olan meteor tozu ortalama olarak milyon yılda 0,1-1 mm birikme oranıyla yere çöker. Bu tozun toplam tortullaşma oranına katkısı o kadar düşüktür ki, karadan çok uzaktaki derin okyanus zeminleri hariç, başka tortullarca tümüyle silinip süpürülür.

Erozyon ve aktarım

Çarpma peyzajı bir kenara bırakılırsa, kayayı aşındırıp sonuçta oluşan parçacıkları başka yere aktarabilen süreçler rüzgâr, akarsular ve hareketli buzdur (buzullar). Kimyasal aşınma sırasında su da kayaları eritebilir. Suyla çözelti olarak taşınan elementler, yeni minerallerde çökelmiş olarak, başka bir yerde yeniden ortaya çıkabilirler. Bu durum özellikle tuz çökeltileri ve aynı zamanda birçok karbonlu kaya türü için geçerlidir. Ancak, Dünya'da kireçtaşının çoğu (kalsiyum karbonat) deniz organizmalarının kabuklarının parçacıklarından oluşur ve bu da erimiş karbonatın (ya da erimiş karbondioksit gazının) kayaya dönüşebilen katı maddeye dönüşmesindeki önemli bir biyolojik adımı gözler önüne serer.

Mars'ın ilk kez 1809'da teleskopla fark edilmiş olan toz fırtınaları ünlüdür. Gezegenin enöteye kıyasla % 40 daha fazla güneş enerjisi aldığı enberide, saniyede 20 metrenin üzerindeki rüzgârlar, yüzeyin büyük bölümünün haftalarca gözlerden saklanmasına yol açacak kadar tozu gökyüzüne



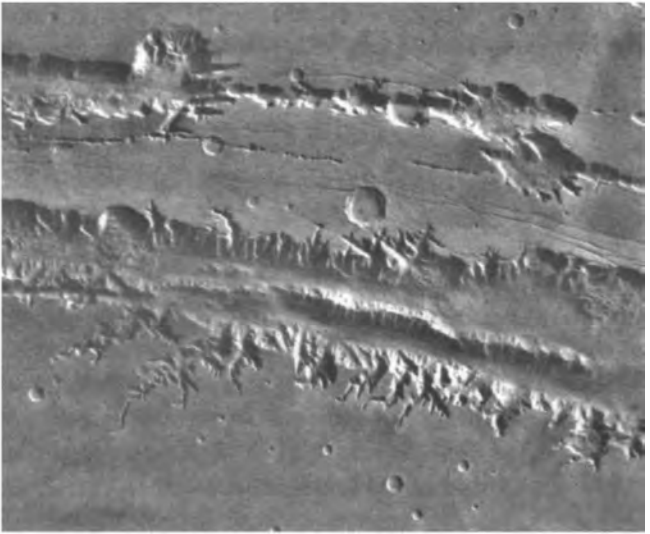
12. Bazı kumullar; tek eksik, birkaç deveyle, ölçeği anlamamız için bir palmiye ağacı. Aslına bakılırsa, bu resim NASA'nın Opportunity aracı tarafından Mars yüzeyinde, bir krater kenarından krater tabanındaki kumul tarlalarına bakılarak çekilmiştir. Görünür alan yaklaşık 100 metre uzunluktadır.

yükseltebilir. Bazen, Olympus Mons'un zirvesi dışında pek az şey görülebilir. Burası sık sık toplanan bulutlar nedeniyle genellikle beyaz görünür; uzay aracından gelen görüntüler asıl durumu gösterdiğinde değiştirilmiş olan eski Nyx Olmpica (Olympos'un Karları) adı da buradan geliyordu.

Rüzgârın Mars üzerindeki etkisinin birçok işareti yörüngeden ya da yerden (Şekil 12), kumullarda ve ayrıca yüzey tozu üzerindeki daha küçük rüzgâr dalgacıklarında görülebilir. Mars'taki kumulların bazıları rüzgâr tarafından aktif olarak şekillendirilmektedir, ama ötekilerin biçimleri muhtemelen milyonlarca yıldır değişmemiştir. Rüzgârın taşıdığı kum Mars'ta önemli bir erozyon etkenidir. Atmosfer basıncının düşüklüğü nedeniyle, kum taneciklerini taşıyabilecek bir rüzgârın Dünya'ya kıyasla çok daha hızlı esmesi gerekmektedir ve açıktaki bazı kaya katmanları aşınma sonucunda ilginç şekillere bürünmüştür.

Venüs'ün atmosferi Dünya'dan çok daha yoğundur ve yer seviyesindeki atmosfer basıncı 92 kat fazladır. Hafif rüzgârlar bile toz parçacıklarını başka yerlere taşıyabildiğinden, Venüs'te birçok kumul alan bulunmaktadır. Ancak, kısmen hızın düşüklüğü ve yoğun havanın darbeyi yumuşatması, kısmen de 480 °C'lik yüksek yüzey sıcaklığı nedeniyle maddenin kırılarak aşınmaktan çok esneyerek biçim değiştirmesi nedeniyle, rüzgârın taşıdığı bir tanecik açıktaki anakayaya çarptığında aşındırma gücü kısıtlı kalır.

Dünyalılar için genellikle en bilindik tortu aktarma etkeni akan sudur – nehir ya da kumsaldaki dalgalar. Şu anda, Güneş Sistemi'nde Dünya dışında hiçbir yer sıvı suyun istikrarlı kalmasına izin verecek yüzey şartlarına sahip değildir. Venüs bunun için çok sıcaktır ve Mars'ta da öğlen sıcaklığı 0° C'nin çok üstüne çıkabilse de, atmosferi çok ince olduğundan, yüzeydeki buz erimek yerine doğrudan buhara dönüşür. Ancak, bir zamanlar Mars yüzeyinde suyun şaşılacak hacimlerde aktığına işaret eden birçok ka-



13. Doğudan batıya uzanan bir dizi kırık, 800 kilometre genişliğindeki bu görüntüde yalnızca bir kesiti görülen, Mars'taki Valles Marineris kanyon kompleksinin tektonik kökenli olduğunu gösterir. Güneyden onu besleyen, dolambaçlı ve oyuk kanallar, ana kanyonun genişlemesinde akar suyun oynadığı rolü gösterir.

nıt bulunmaktadır (Şekil 13). Mars en az Dünya'ya eşdeğer aşırı iklim şartlarına maruz kalmıştır ve milyarlarca yıl önce atmosferi yağışa ve felaket düzeyinde sellere olanak tanıyacak kadar yoğun ve nemliydi. Güneş Sistemi'ndeki en büyük kanyon sistemi olan Valles Marineris ("Mariner Vadileri"; adını 1971'de *Mariner* 9 araştırma aracının gönderdiği görüntülerde keşfedilmesinden alır) kabuğun kırılmasıyla oluşmaya başlamış, ama içinden suyun akması

sonucunda erozyonla genişlemiş, 4.000 kilometre uzunluğunda bir çöküntü sistemidir. En derin noktasında, zemin, kenarların 7 kilometre altındadır (Dünya'daki Grand Canyon yalnızca 2 kilometre derinliğindedir) ve öylesine geniştir ki, bir kenarında durduğunuzda öteki taraf ufkun ötesinde gözden saklanacaktır.

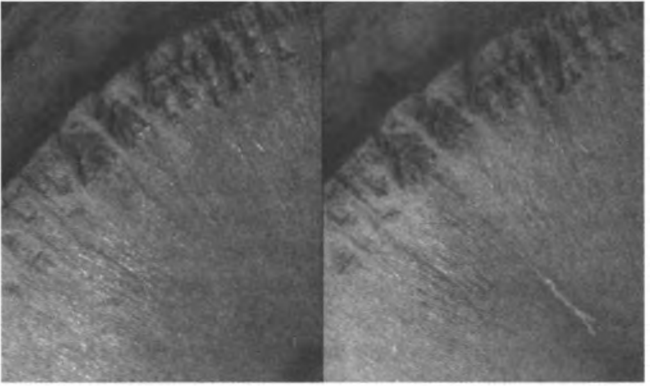
Valles Marineris, büyüklüğüne rağmen, Uzay Çağı öncesinin teleskop kullanan gözlemcilerince fark edilmemişti. 1877'de İtalyan Giovanni Schiaparelli'nin haritaya döktüğü ve sonrasında da 1916'daki ölümüne dek bunları akıllı Marslıların devasa mühendislik eserleri sanan Amerikalı Percival Lowell'ın savunduğu ünlü Mars "kanalları" asılsızdır. Mars üzerindeki çok sayıda gerçek kanalla hiçbir ilgileri yoktur. Bunlardan, (Şekil 13'te gösterilenlerin çok daha uzun çeşitlemeleri dahil) dallanan bir kollar ağıyla beslenen örnekler, büyük olasılıkla yağışla besleniyordu. Ötekilerden akan suysa, belki de permafrost eridiğinde, yerden sızmış olabilir. Kanalların düzlüklere çıktığı "ada"ların şekillerinin düzlüğü, felaket düzeyinde sellerle oyulduklarını gösterir. Bu tür yerlere inen robot uzay araçları (1976'da *Viking 1* ve 1997'de *Mars Pathfinder*), taşkın sularının bıraktığı çok sayıda kaya bulmuştur.

Mars'taki başlıca vadilerin hepsinde sayısız çarpma krateri açıldığına göre, açıkça eski ve en son bir milyar yılı aşkın zaman önce akmış olmalılar. O zamandan bu yana birçoğunun duvarlarında toprak kayması olmuştur ve şu anda tabanlarında, uzunlukları boyunca uğuldayan soğuk rüzgârın oluşturduğu kumul dizileri bulunur. 1970'lerde ve 1980'lerde, bilim insanlarının çoğu, Mars'ın uzak geçmişinde en az bir nemli çağ yaşamış olmasına karşın, küçük

su-buzu takkelerinin bulunduğu kutuplar hariç, şu anda aşırı derecede kuru olduğunu söylerlerdi size. 1999'da, Mars Orbiter Camera adında yüksek çözünürlüklü bir görüntüleyici, Mars'taki birçok yerde, dik yamaçlardaki yalnızca birkaç metre genişlikte ve birkaç yüz metre uzunlukta olukları gözler önüne sermeye başladığında herkesin ne kadar şaşırdığını bir düşünün. Sonradan açılmış kraterlerin bulunmaması ve pek çok örnekte aşağı uçlarındaki döküntü birikintilerinin kumulları gömmeye başlamış olduğu gözlemi, bunların genç yüzey özellikleri olduğunu gösterdi, ama ne kadar genç? Sonradan alınan görüntülerin değişimleri gözler önüne sermeye başlamasıyla, bazılarının günümüzde hâlâ aktif oldukları yönünde kanıtların gelmeye başlaması uzun sürmedi (Şekil 14).

Tartışma artık en genç oyukların yaşının sorgulanmasından uzaklaşmış ve nasıl oyulduklarına odaklanmıştır. Kuramlardan biri, sorumlunun su olduğu yönündedir. Mars'ın alttoprağında, basınç altında sıvı yeraltı hazneleri olabilir. Şekil 14'teki krater duvarı gibi bir eğimin su tablosunun altına ulaştığı yerlerde toprağın içindeki buz bariyeri ("permafrost") kaçmasını normalde engelleyecektir. Ancak, bariyerin geçici olarak geçit vermesi durumunda su dışarı fışkırır. Sıvı istikrarlı olmayacak –akarken hem kaynayıp hem donacak– ama tümüyle buharlaşmadan önce bu oyuklardan birini boylu boyunca aşabilecektir. Kuşkucular, oyukların açılması için sıvı suya gerek olmadığını ve bunların kuru kaya heyelanlarının sonucu olarak açıklanabileceğini savunuyorlar.

Kimi Mars bilimciler, özellikle de yüksek platoların aşınmış kenarlarında buzul kanıtları görüyorlar. Günü-



14. 6 kilometre çaplı bir Mars kraterinin iç duvarını kaplayan, 1,5 kilometre genişliğindeki alanın Ağustos 1999 (sol) ve Eylül 2005'te (sağ) kaydedilmiş iki görüntüsü. Kraterin ağız kenarı sol üstü çaprazlama keser ve taban alt sağa doğrudur. İç duvarın yamacında oyulmuş birçok oluk vardır ve, görünüşe bakılırsa, içlerinden biri bu iki tarih arasında akmış ve alt yamaca soluk renkli döküntü taşımıştır.

müzde, (kutuplar hariç) yüzeyde açıkta hiç buz yok, ama yörüngeden alınmış yüksek çözünürlüklü görüntülerdeki kaya dolu zemin, alttaki buzu örten (ve yalıtan) döküntü olabilir. Mars yörüngesinden elde edilmiş, zemine nüfuz edebilen radar verileri buna inanılırlık kazandırıyor; Şekil 10'da görülen bölgeyi lav akışı yerine tozla kaplı donmuş deniz olarak kabul etmenin beni daha çok memnun etmesinin nedenlerinden biri de bu.

Ay'daki Hadley Rille (Şekil 5) gibi kanallar lavın geçtiği yollardı ve kesinlikle suyla oyulmamıştı; Ay'daki yegâne su, kutupların yakınlarındaki regolitte bulunan düşük

miktarlarda buzdur. Venüs'te içlerinden biri 6.800 kilometre uzunlukta olmak üzere 200'den fazla kıvrımlı kanalın haritası çıkarılmıştır. Bu kanalları oymaya yetecek miktarda sıvı suyun bulunması için gereken yeterince aşırı iklim değişiminin Venüs'te yakın zamanlarda yaşanmış olması hiç olası görünmediğinden, bunlar da muhtemelen lavla oyulmuştur.

Yüzey özelliklerinin adlandırılması

Öteki gezegenlerdeki yüzey özelliklerinin adlarını şimdiden birçok kez kullandım: Olympus Mons, Valles Marineris, Hadley Rille vb. Bu tür isimler olmasa, bunlardan "Mars'taki en büyük volkan", "Mars'ın devasa kanyon sistemi" ve "*Apollo 15*'in indiği yerin yakınlarındaki şu büyük hendek" diye söz etmek zorunda kalırdım. Akılda tutulması olanaksız bir koordinat sistemi kullanılmadıkça, daha az göze çarpan yüzey özelliklerinin tanımlanması iyice zor olurdu.

Ama oralarda kimse yaşamadığına göre bu adları kim veriyor ve ne derece resmiler? Gökbilimciler teleskopları sayesinde ilk kez haritalar çizmeye başladıklarında, aralarından bazıları, daha önceki çalışmaları genellikle dikkate almadan kendi adlarını icat edecek kadar bağımsız zihniyetliydi. 1919'da kurulan IAU'nun ilk görevlerinden biri bu kargaşayı çözmek, çok sayıda ad taşıyan yüzey özellikleri için tek bir resmi ad bulmak ve gelecekte verilecek adlar için standart ve gelenekler getirmek oldu. Bu sistem yeni keşfedilen gökcisimleri ve, ayrıca, gezegenlerin yüzeylerin-

deki, adlandırılmak istenebilecek ya da görüntüleme tekniklerindeki ilerlemeler sayesinde görünür olacak yüzey özellikleri için geçerliydi. İlk başta, bu sonuncusu yalnızca daha büyük ve daha iyi teleskoplar anlamına geliyordu ve gezgin uzay araçlarının ortaya çıkardığı yüzey özelliklerinin adlandırılmasının denetimi için bir yol geliştirmiş olduklarını IAU'nun kurucularından pek azı fark edebilirdi.

IAU'nun Plüton'un yeniden sınıflandırılması konusundaki tutumunu kınayanlar olmuştur, ama IAU idaresindeki adlandırma sürecinin temeli konusunda olumsuz düşünen kimseyi tanımıyorum. Siyasi olmayan, adil bir sistem bunu ve dünyanın tüm kültürlerini temsil etmeyi amaçlıyor – ille de herhangi bir tekil gökcismi üzerinde değil, tüm Güneş Sistemi boyunca dengelenmiş olarak.

IAU adlandırma sistemi ayın yüzey özellikleri için zaten yaygınlaşmış uygulamayı geliştirerek kraterlere tek bir belirtisiz ad, öteki yüzey özelliklerinin çoğunaysa bir ad ve, ayrıca, ne tür bir özellik olduğunu belirten, Latince, tanımlayıcı bir terim verir. Yani, Olympus Mons" "Olympus Dağı" anlamındadır ve bu özelliğin Olympus adında bir dağ olduğunu size hemen gösterir. Olympus Dağı'nın bir volkan olduğundan kimsenin kuşkusunun bulunmamasına karşın, tanımlayıcı terimin bunu belirtmediği kaydedilmelidir. Tanımlayıcı terimler (ileride yanlış oldukları ortaya çıkabilecek) *yorumlamadan* bilinçli olarak kaçınır ve *tanımlamakla* yetinirler.

Karşılaşabileceğiniz yaygın betimleyici terimler şunlardır: chasma (derin, uzun, sarp kenarlı çöküntü), fluctus (akışa benzer bir özellik), fossa (uzun, dar, sığ çöküntü), mensa (tepesi düz, kenarları yara benzeyen çıkıntı), pla-

nitia (alçak düzlük), planum (yüksek düzlük ya da plato), rupes (yar) ve vallis (çatallanan vadi). Ayrıca, Ay'da "deniz" olarak çevrilen, ama iyice yerleştiği için daha uygun bir terimle değiştirilmeyen mare'ler de (çoğulu maria) vardır.

Her gezegendeki adlar için temalar da vardır. Ay kraterleri adlarını ünlü müteveffa bilim insanları, akademisyenler ve sanatçılardan alır, mare'ler ise çeşitli hava şartlarını betimleyen Latince terimlerden. Mars, Ay dışında, IAU'nun işe karışmasının öncesinden kalmış önemli düzeyde bir ad mirasına sahip tek yerdir. Bunlar, modern tanımlayıcı terimler eklenmiş olarak, 19. yüzyıl sonlarında Giovanni Schiaparelli'yle Eugenios Antoniadi'nin teleskopik haritalandırmalarından gelirler ve çoğu Tharsis ve Elysium gibi geniş bölgeleri tanımlar. Her büyük vadiye Mars'ın farklı bir dildeki adı verilir, küçük vadilerse adlarını Dünya'daki nehirlerden alırlar. Venüs'teki adların neredeyse tamamı kadın adlarıdır: kraterlere tarihteki ünlü kadınların, öteki yüzey özelliklerineyse tanrıçaların adları verilir. Merkür'de kraterlere müteveffa sanatçıların, müzisyenlerin, ressamların ve yazarların, scarp'lara (yarlar) ise bilimsel keşif gezilerinin ya da bu keşiflerde kullanılan gemilerin adları verilir. Beagle Rupes'in (Şekil 4) adı, Charles Darwin'in evrim kuramını esinlendiren gözlemlerini yaparken yolculuk ettiği *HMS Beagle*'dan gelir.

Asteroitlerin ve öteki gezegenlerin uydularının adları için de benzer kurallar geçerlidir. Örneğin, Jüpiter'in uydusu Europa'nın kraterlerine Kelt tanrılarının ve kahramanlarının adları verilmiş, öteki yüzey özelliklerinin çoğuysa adlarını Europa hakkındaki klasik mitten almışlardır.

Her yerbenzeri gezegen, doğumundan sonra, iç gazların magma okyanusu aracılığıyla dışarı sızdığı dönemde bir atmosfer geliştirmiş olmalıdır. Bu ilkel atmosferler günümüze ulaşamamıştır, ama volkanlardan dışarı kaçan gazlar neye benzeyebileceklerini gösteriyor. Ay ve Merkür'ün kütleçekimleri bir gaz battaniyesine tutunamayacak kadar düşüktür ve kimi zaman onlar için söylendiğini duyabileceğiniz, basınçları Dünya atmosfer basıncının milyarda birinden çok daha düşük olan "atmosferler" büyük oranda mikro-göktaşı ve kozmik ışın çarpmasıyla yüzeyden sekmiş başıboş atomlardan oluşur. Bu atomlar son derece seyrek olduklarından, bir başka atomla çarpışmak yerine uzaya sürüklenmeleri olasılığı daha yüksektir. Bu durum bir gezegenin "ekzosfer"ini tanımlar. Çoğu atmosferde, ekzosfer, atmosferin zayıf en dış bölgesidir, ama Ay ve Merkür ancak bu kadarını edinebilirler.

Daha büyük yerbenzeri gezegenlerin kütleçekimlerinin daha güçlü olması, yoğunlukları ve kimyasal bileşimleri sayısız sürecin sonucunda gelişmiş olsa da, gaza daha etkili biçimde tutunmalarını sağlar. İlk zamanlarda, daha aktif olan güneş rüzgârı ilk atmosferlerin çoğunu dağıtmış olabilir, ama volkanik faaliyetler bunları yenileyecektir. Süregiden önemli bir süreçse, kısa dalga boyu güneş ultraviyole ışığının su buharı moleküllerini hidrojen ve oksijene ayırabilmesidir. Hidrojen çok hafif olduğundan uzaya kaçabilir ve dolayısıyla suyun bu "ışılayrışımı" geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Venüs ve Mars ilk baştaki sularının büyük bölümünü bu şekilde kaybetmişlerdir. Venüs, Dünya ve

Tablo 4. Yerbenzeri gezegenlerin günümüz atmosferleri; en yaygın altı gazın miktarı, toplam molekül sayısının yüzdesi olarak ifade edilmiş (Dünya atmosferinde su çok değişkendir) ve yüzey basıncı da Dünya'yla göreceli olarak verilmiştir.

Venüs		Dünya		Mars	
CO_2	96,5	N_2	78,1	CO_2	95,3
N_2	3,5	O_2	20,9	N_2	2,7
SO_2	0,015	H_2O	4'e kadar	Ar	1,6
H_2O	0,01	Ar	0,93	O_2	0,13
Ar	0,007	CO_2	0,034	CO	0,07
H_2	(0,0025	Ne	0,0018	H_2O	0,03
Yüzey basıncı	92	Yüzey basıncı	1	Yüzey basıncı	0,0063

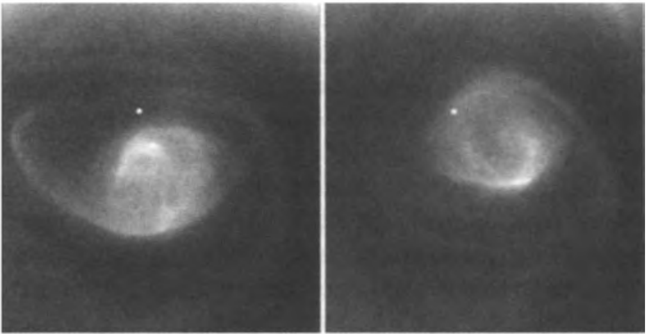
Mars'ın günümüz atmosfer bileşimleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Ultraviyole ışığının parçaladığı atmosfer molekülleri, "fotokimya" olarak tanımlanan bir dizi tepkimeyle, başka moleküllerle birleşebilir. Bu durum, özellikle, gezegenin yüzeyin yaklaşık 100 kilometre yukarısında başlayan "termosferinde" oluşur; termosferin bu adı almasının nedeni, bu katmanın ya moleküllerin parçalanmasında ya da bazı elektronlarından ayrılmasında kullanılan güneş ultraviyole enerjisiyle ısınmasıdır. İkinci sürece iyonlaşma adı verilir ve iyonlar (Dünya için ağırlıklı olarak oksijen ve Venüs'le Mars için karbondioksit) termosferin dış kesimlerinde, "iyonosfer" olarak adlandırılan elektrik iletkeni

bir katman yaratacak kadar yoğun olabilir. Bir güneş fırtınası Güneş'ten Dünya'ya plazma taşıdığında manyetik alan bozulur ve iyonosferde radyo iletişimini kötü derecede bozabilecek, hatta enerji kesintilerine yol açabilecek alışılmadık akımlar oluşur.

Atmosferin, kısa dalga boylu ultraviyolenin nüfuz etmediği daha derin katmanları fotokimyadan etkilenmez. Burada hava çoğunlukla (doğrudan Güneş'in ısıttığı) yerle temas sonucunda ısınır ve, bu nedenle, troposfer adı verilen en alt katmanda atmosfer sıcaklığı yukarıya çıkıldıkça düşer. Yukarıya doğru çıkıldıkça atmosfer basıncı ve yoğunluğu da düşer ve bu da atmosfer kütlesinin çoğunu troposferin içermesi anlamına gelir. Troposferdeki bileşim, havayla kaya arasındaki kimyasal tepkimeler (kimyasal aşınmanın bir sonucu) ve özellikle de (belki de yalnızca) Dünya'da yaşamın oluşması sonucunda evrilebilir. Dünya'da bitkiler ve ilkel tekhücreli organizmalar bedenlerini oluşturmak için güneş enerjisini ve atmosferdeki karbondioksiti kullanır ve ilk atmosferde yok denecek kadar ender olan gaz oksijeni dışarı salarlar. Bitkiler olmasa, (bizim gibi) oksijen soluyan hayvanlar da olamazdı. Birazdan açıklayacağım gibi, sıcaklık da şimdikinden farklı olurdu.

Troposfer tabanına yakın hava ısındığında genleşmesi gerekir ve bu da onu hareketlendirir. Ardından yükselir ve yerini yukarıdan gelen daha soğuk havaya bırakır. Bu, (daha önceden gezegen mantosunda karşılaştığınız) ısı taşınımının bir başka örneğidir ve Dünya, Venüs ve Mars'ta hava durumunu yönlendiren de budur. Dolaşım modeli gezegenin dönme hızı (Venüs'te yavaş), atmosferin



15. Venüs'ün 2.000 kilometre çaplı güney kutbu girdabının "gözü", 24 saat arayla görüntülenmiş olarak. Nokta, güney kutbuna işaret eder. Orta-kızılötesinde kaydedilmiş olan bu görüntüler, yüzeyin 60 kilometre üzerindeki bulut tepelerini görmektedir. "Göz"ün merkezi daha sıcaktır (daha parlak görünür) ve bu da burada bulutların aşağıya, daha sıcak ve derin düzeylere doğru çekildiğini gösterir.

dönme hızı (Venüs'ün üst troposferinde gezegeninkinden çok daha hızlı) ve gündüz-gece sıcaklıklarındaki farklılık (Mars'ta yüksek, Venüs'te düşük) gibi etmenlere de bağlı olduğundan, her birinde farklıdır. Şekil 15'te Venüs'ün güney kutbu üzerindeki karakteristik dolaşım gösterilmektedir. Dünya atmosferindeki sarmal fırtına sistemleriyse, aksine, genellikle tropikler yakınlarında başlar.

Dünya'nın atmosferi, katmanlarının karmaşıklığı açısından da komşularından farklıdır. Venüs ve Mars'ta sıcaklık troposferde irtifayla hızla düşer, sonra mezosfer denen (ısı taşınımının olmadığı) bir katmanda irtifayla daha yavaş olarak düşer ve ardından termosferde ultraviyole soğrulması nedeniyle irtifayla birlikte yükselir. Yerben-

zeri gezegenler arasında, Dünya, troposferiyle mezosferi arasında, yaklaşık 10-50 kilometre irtifa arasında uzanan, sıcaklığın irtifayla birlikte arttığı bir katmanının bulunmasıyla tek örnektir. Ozon moleküllerinin (termosfer ve mezosferin geçirdikleri) 230-350 nanometre dalga boyu ultraviyole fotonlarını soğurmasıyla ısınan stratosferdir bu. "Oksijen" dendiğinde genellikle iki oksijen atomu (O_2) kastedilirken, ozon, tek bir molekülde (O_3) bağlanmış üç oksijen atomudur ve atmosferin daha yüksek bölümlerinde, fotokimyasal tepkimelerle, oksijenden derlenir.

Sera etkileri ve ozon tabakasındaki delik

"Ozon tabakasındaki delik"ten ve "sera etkisi"nden birçok insan haberdardır, ama genellikle, bunları iklim değişiminin ikiz sorumluları olarak bir araya getirirler. Ancak, aslında ikisi birbirinden çok farklıdır.

Ozon tabakası (bir tek) Dünya stratosferinde görülür ve 230-350-nanometre ultraviyole ışığının soğurulduğu yerdir. Bu düzeyde bir radyasyon önü kesilmediği takdirde deri kanserlerine ve genetik tahribata yol açabileceğinden, ozon tabakası bizler ve yüzeyde yaşayan öteki canlılar için çok önemlidir. Etkili bir güneş engelleyici olarak şaşırtıcı derecede az ozon yeterlidir. Stratosfere dağılmış tüm ozonu deniz seviyesindeki tek bir katmanda toplasanız, yalnızca yaklaşık 3 milimetre kalınlığında olurdu. Çok narin bir perdedir bu, ve dolayısıyla, 1970'lerde ve 1980'lerde Antarktika üzerinde stratosferin ozonunun yarısını kaybetmiş olduğunun anlaşılması önemli düzeyde kaygı yarat-

tı ve "ozon tabakasındaki delik"ten söz edilir oldu. Başlıca neden, kloroflorokarbonlar (CFC'ler) denen sanayi kimyasallarını içeren tepkimelere bağlandı ve bu nedenle, atmosfere sızmamaları için, CFC'lerin eskisi gibi aerosol sprey ve soğutucularda kullanılması yasaklandı. Antarktika "ozon deliği" ve Arktik üzerindeki daha küçük bir delik şu anda istikrarlı durumdadır. Kutup bölgeleri dışında ozon tükenmesi yalnızca % birkaç düzeyinde ve tropiklerde saptanamaz düzeydedir.

Ozon konsantrasyonuyla ortalama küresel sıcaklık arasında basit bir bağ bulunmuyor. Ozon tabakasının ileri derecede tükenmesi hayatı çekilmez hale getirir, ama iklim değişimiyle ya da küresel ısınmayla ilgisi pek azdır. Bir gezegenin troposfer sıcaklığını, alt atmosferin kızılötesi ışınımını etkin biçimde soğurma düzeyi belirler. Bunun nedeni, görünür güneş ışığının yeri ısıtması ve ısınan yerin kızılötesi ışınımı yaymasıdır. Atmosfer sıcaklığı iki etmene bağlıdır: yerle teması sonucunda aldığı ısı ve dışarı giden kızılötesi ışınımın ne kadarını soğurabildiği.

Gaz türlerinin çoğu kızılötesi ışınımı geçirir, ama iki ya da daha çok farklı element içeren moleküller kızılötesini oldukça güçlü bir biçimde soğururlar. Dolayısıyla, nitrojen (N_2), oksijen (O_2) ve argon (Ar) kızılötesini soğurmaz, ama su buharı (H_2O), karbondioksit (CO_2), kükürtdioksit (SO_2) ve metan (CH_4) soğurur. Sıcaklığın seranın içine hapsedilmesiyle arasında benzetme yapılarak, buna "sera etkisi" denir. Venüs, Dünya ve Mars'ın atmosferlerinde doğal bir sera etkisi vardır. Büyük oranda muazzam karbondioksit yükü nedeniyle, Venüs üzerindeki atmosferik sera etkisi, gezegenin yüzey sıcaklığını, aksi takdirde ola-

cağın 500^0 C gibi etkileyici bir düzeyde üzerinde tutar. Su buharı ve karbondioksit Dünya'yı yaklaşık 30^0 C ısıtır; çok ince bir karbondioksit zengini atmosferi bulunan Mars'ın sera ısınmasıysa yalnızca 6^0 C civarındadır.

Dünya'nın sera etkisi, sıcaklığı, burada gelişmiş yaşama uygun bir aralıkta tutar. Bizzat yaşamın vasıta olduğu sera etkisinin gücü, sıcaklığı doğru aralıkta tutacak şekilde değişmiştir. Dört milyar yıl önce Güneş günümüzdekinin yalnızca yaklaşık % 70'i kadar parlak olduğundan, atmosfer günümüzdekinin aynısı olsaydı, Dünya çok daha soğuk olurdu. Ancak, 4 milyar yıl öncesinde atmosfer muhtemelen çoğunlukla karbondioksitten oluşuyordu ve günümüzdekinden 100 kat daha yoğundu, yani sera etkisi çok daha güçlü olacaktı. Yaklaşık yarım milyar yıl önce, ilkel suyosunları sayesinde karbondioksit içeriği günümüzdeki değerin on katına dek indi; dolayısıyla, sera etkisi de elbette azalmış olmalıdır. Serbest oksijen (O_2) ilk olarak 2,7-2,2 milyar yıl önce arası bir zamanda ortaya çıktı ve 250-200 milyon yıl önce arası bir dönemde şu andaki konsantrasyonunun % 170'i düzeyinde zirveye çıktı. Dünya'daki yaşamın atmosfer bileşimindeki değişimleri hem etkilediği, hem de bunlardan yararlandığı açıktır.

Sanayi çağının başlangıcından bu yana insan faaliyetleri atmosferi çeşitli şekillerde etkiledi: ozonun tükenmesi, sanayinin havayı kirletmesi vb. Ancak, bizi en çok endişelendirmesi gereken, atmosfere karbondioksit salmamız ya da, daha doğrusu, *geri* salmamızdır; ne de olsa bu karbondioksitin büyük bölümü daha önceden organizmalar tarafından atmosferden alınıp kömür ya da petrol olarak saklanmıştır. 1960'tan bu yana geçen 50 yılda atmosfer-

deki karbondioksit miktarı yaklaşık % 20 (her doğal süreçten daha hızlı) artmıştır ve hâlâ artmaktadır. Bu "insan kaynaklı sera etkisi"nin küresel iklimde ısınmaya yol açması kaçınılmazdır. Sıcaklıklardaki birkaç derecelik artış ekosistemleri etkileyecek ve yerel hava durumlarını (kısa vadeli sıcaklık dalgalanmaları dahil) aşırılaştırabilecektir. Bir diğer sonucuysa, ağırlıklı olarak suyun ısındıkça genleşmesi nedeniyle, küresel deniz seviyelerindeki yükselme olacaktır. Yani, atmosferimizdeki doğal sera etkisi iyi bir şey olsa da, bu etkide görülen insan kaynaklı hızlı artışlar uygarlığımız açısından felaket düzeyinde sonuçlara neden olabilir.

Doğal sera gazı etkisindeki, Güneş'in parlaklığının yavaş yavaş artmasına karşı denge oluşturmuş genel aşamalı azalma arka planında, Dünya ikliminde birçok dalgalanma olmuştur. Yüzey sularının büyük bölümünün (aşırı örneklerdeyse tamamının) donduğu Buz Çağları en iyi bilinen örneklerdir. Bunlar atmosferden çok, eksen eğikliğindeki ve eksenin dış merkezliliğindeki değişikliklerin etkisindedir. Mars'ın yüzey neminde zaman içerisinde görülen çarpıcı değişimler de muhtemelen benzer etkilerle açıklanabilir.

Bulutlar

Bulutlar son derece yansıtıcı olduklarından, atmosfer ne kadar bulutluysa, o kadar güneş enerjisi doğrudan uzaya geri yansıtılır. Ancak, bulutlu gökyüzü, atmosferin yere *ulaşmayan* güneş ışığı ısısını hapsetme kapasitesini artırır;

bu nedenle, bulutların küresel sıcaklık üzerindeki etkisi karmaşıktır. Venüs'ün kesintisiz bulutları, yüzeyini sera etkisiyle pişmekten kurtaramamıştır.

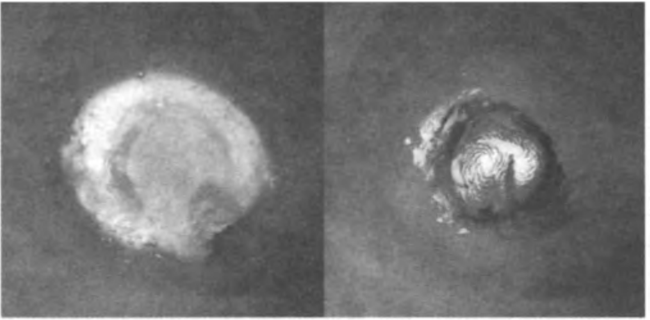
Bulutlar, sıcaklık ve basıncın, atmosferin bazı unsurlarının sıvı damlacıklar ya da buz parçacıkları olarak yoğuşması için uygun şartları yaratmasıyla oluşur. Yerbenzeri gezegenlerde söz konusu unsur genellikle sudur. Suyun Venüs atmosferinin küçük bir parçasını oluşturmasına karşın, troposferinin tepesinde, yüzeyin yaklaşık 45-65 kilometre yukarısında sürekli bir bulut katmanının oluşmasına yetecek kadar su vardır. Burada su buharı yaklaşık 2 mikrometrelik damlacıklar halinde yoğuşur. Bunlar yere düşemeyecek kadar küçük olduklarından asılı kalır ve aerosol damlacıklar olarak tanımlanırlar. Atmosferdeki kükürtdioksit bunların içinde çözüldüğünden, sülfürik aside dönüşürler. Ancak, size "Venüs'te sülfürik asit yağar" diyen biri çıkarsa, yanılıyordur. Atmosfer dolaşımının damlacıkları yaklaşık 45 kilometrenin altına indirdiği yerlerde ısı bunların yeniden buharlaşmasına neden olur ve yere düşecek büyüklükte yağmur damlalarına dönüşme olanağını asla bulamazlar.

Yaklaşık 6 kilometrenin üzerinde Dünya'nın bulutları çoğunlukla küçük buz parçacıkları içerirler ve bu yüksekliğin altındaysa çoğunlukla su damlacıkları halindedirler. Yağmur bulutları aslında gri değildir; ışığı perdeleyebilecek kadar kalın olduklarından öyle görünürler. Mars'ta buluta görece ender rastlanır. Troposferinin büyük bölümünde su buzundan oluşmuşlardır; 80 kilometre civarında, troposfer/mezosfer sınırı yakınlarındaysa karbondioksit parçacığı bulutları gözlenmiştir.

Atmosfer unsurları yoğuşarak bulutları oluşturabilecekleri gibi, yüzeyde buz ya da sıvı olarak da yoğuşabilirler. Günümüzde, Dünya, elbette sudan oluşan okyanusların bulunduğu tek yerbenzeri gezegendir. Kutup yakınlarında su donarak kutup takkelerini oluşturur. Genç Venüs gezegeni, (sonradan ışılayrışımla kaybedeceği) buharlaşmış su buharının filizlenmekte olan sera gazı etkisini artırarak günümüzdeki kavurucu sıcaklığın yolunu açmasından önce, üzerini okyanusların kapladığı kısa bir dönem yaşamış olabilir.

Ancak, Mars farklıdır. Yaklaşık 3,8 milyar yıl önce alçak kuzey düzlüklerinin tamamını kaplamış devasa bir "Oceanus Borealis" düşüncesi 1990'larda çok revaçtaydı. Bu düşünce hâlâ tartışmalı olsa da, Mars'ta, Şekil 13'teki gibi kanalların aktığı zamanlarda "deniz" denebilecek kadar geniş göllerin bulunduğu olasılığını birçokları kabul edecektir ve bunların bazı donmuş kalıntıları günümüze ulaşmış ve toz altına gömülmüş olabilir (Şekil 10). Ancak, günümüzde Mars'ın kutup takkelerinde buz bulunduğundan hiç kuşku yoktur (Şekil 16). Bunlar, mevsimsel olarak genişleyip daralan karbondioksit don saçağıyla, "daimi" bir su-buzu içerirler.

Dünya'nın ve Mars'ın kutup takkeleri atmosferle etkileşirler. Aslında, ya kar halinde bulutlardan yere inen ya da doğrudan yer üzerinde yoğuşan, atmosferden "donmuş" gaz çökeltileridirler. Sıcaklık yükseldiğinde kutup takkelerindeki maddeler ya eriyerek ve ardından buharlaşarak (Dünya'da ve muhtemelen geçmişte Mars'ta su için) ya da



16. Mars'ın kuzey kutup takkesinin bahar başları (solda) ve yaz ortasındaki (sağda) 1.500 kilometre genişliğindeki görüntüleri. Yazın karbondioksit donunun çoğu uçunmuş (buzdan buhara dönüşmüş) ve geriye yalnızca kalıntı, "daimi" su-buzu takkesini bırakmıştır.

doğrudan buzdan buhara uçunarak (Mars'ta günümüzde karbondioksit ve su için) atmosfere dönerler.

Ay ve Merkür gibi havasız gökcisimlerinde böyle dengeler oluşamaz ve, dolayısıyla, kutup takkeleri beklenmez. Ancak, 1990'larda her iki gökcisminin de kutuplara yakın kraterlerin içindeki sürekli gölgeli bölgelerinden radar sinyallerinin alışılmadık bir güçle yansıdığı kaydedildi. Bu durum, regolit içerisinde tanecik halinde dağılmış su-buzuyla uyumlu olacaktı. Olası bir açıklamaya göre, bu kraterlerin zeminleri çok soğuk olduğundan, içlerine giren herhangi bir başıboş molekül genellikle "soğuk tuzaklar"da yüzeye yapışır. Söz konusu suyun bu gökcisimlerinin özgün envanterinin parçası olması ille de gerekmez; sonradan, gökcismine çarpan kuyrukluyıldızlarla gelmiş olabilir. Bir

insan kolonisi ya da hatta sürekli kullanılacak bir üs bile kurulacaksa, Ay'da su kaynağı bulunması çok önemlidir. Kutuplar açıkça en iyi olasılıktır ve 2009'da, bir uzay aracı sürekli gölgeli olan bir kutup kraterine çarptığında oluşan bir püskürtü sorgucunda suyun varlığı doğrulanmıştır. Öteki uzay araçlarının elde ettiği kızılötesi tayflar, daha geniş bölgelerde, regolitte suyun ve sulu minerallerin bulunduğunu açığa çıkardı; yoğunlukları çok düşük olsa da, bu durum, Ay'ın eskiden sanıldığı kadar tümden barınılamaz olmayabileceği umutlarını güçlendirdi.

Döngüler

İç kesim, yüzey ve atmosfer arasındaki etkileşim ve aralarındaki bileşen döngüsü son derece önemlidir. Dünya'nın "hidrolojik" döngüsü en tanıdık örnektir. Tek bir döngü değil, birbirleriyle bağlantılı halkalar dizisidir. Temelde, okyanuslardaki su buharlaşarak bulutları oluşturur ve sonra yoğunlaşarak yağmura ya da kara dönüşür, bunlar da sonunda (nehirler ya da mevsimsel kutup takkeleri aracılığıyla) yeniden okyanuslara döner. Su iç kısma çekilebilir (dalma bölgelerinde derinlere ya da yere sızma yoluyla daha sığ olarak) ve volkanlar yoluyla yeniden yüzeye çıkabilir. Ayrıca, kayayla kimyasal etkileşime girebilir (kimyasal aşınma) ve minerallerin içinde depolanabilir. Ayrıca, halkaları atmosferdeki karbondioksit, canlı bitki ve hayvanlar, çözünmüş karbondioksit, deniz kalkerleri, hidrokarbon çökeltileri, volkan gazları vb. arasında geçen önemli bir "karbon döngüsü" de vardır.

Daha ender ve farklı zaman ölçeklerinde oluşsa ve ayrıca her halkanın göreceli önemi farklı olsa da, Mars'ta da benzer döngülerin olduğu kesindir. Venüs'te de, karbondioksit ve kükürtdioksiti içeren, atmosferin aşındırdığı yüzey kayalarının zamanla lav akışlarınca gömüldüğü derinliklerde gazların bir kez daha serbest kalıp volkan ağızları yoluyla yeniden atmosfere kaçtığı, muhtemelen daha da yavaş döngüler olması muhtemeldir. Bu çok-halkalı ve birbirleriyle bağlantılı döngülerin karmaşıklıklarını ve zaman ölçeklerini keşfedip belgeleyene dek, her bir gezegeni neyin "işlettiği" konusundaki anlayışımız yetersiz kalacaktır.

III. Bölüm

DEV GEZEGENLER

Dev gezegenler, Güneş Sistemi'ne hükmeden gökcisimleridir – elbette, boyutun önemli olduğunu düşünenlerdenseniz ve Güneş'i görmezden gelmeye hazırsanız. Dört dev gezegen, Şekil 3'ün alt yarısında ölçeklerine göre gösterilmiştir; boyutlarının yerbenzeri gezegenleri nasıl da gölgede bıraktığı burada görülmektedir. Uranüs'ün görüntüsü Dünya yörüngesindeki Hubble Uzay Teleskobu'ndan alınmış, öteki dev gezegenlerse gezgin uzay araçlarından görüldüğü şekilde verilmişlerdir. Yoğunlukları yerbenzeri gezegenlerden düşük olduğundan, kütle açısından hâkimiyetleri o kadar ezici değildir. Jüpiter'in yoğunluğu Dünya'nın yoğunluğunun yalnızca % 24'ü kadar, Satürn'ün yoğunluğuysa daha da düşüktür ve yeterince büyük (ve tümüyle varsayımsal) bir kova suya bırakıldığında yüzebilecektir. Hepsinin ekvator düzlemlerinde halkalar vardır, ancak yalnızca Satürn'le Uranüs'ün halkaları Şekil 3'te görülebilecek düzeydedir. Halkalar katı görünseler de, aslında yörüngedeki sayısız parçacıktan oluşurlar

ve son derece zayıftırlar. Bunlar dev gezegenlerin uydularıyla birlikte bir sonraki bölümde tartışılacaklar.

Geleneklere göre, dev bir gezegenin boyutu, bulutlarının tepesinden başlayarak ölçülür. Bulutlar gezegenin troposferinde oluşur; bunun yukarısında, Dünya atmosferiyle aynı şekilde sınıflandırılabilen, büyük oranda şeffaf ve yoğunluğu giderek azalan katmanlar vardır. Dev bir gezegenin troposferinin tabanının tanımlanması güçtür ve Jüpiter örneğinde bile hiç incelenmemiştir; 1995'te *Galileo* uzay aracının Jüpiter'e bıraktığı bir giriş araştırma aracı, basınç (22 atmosfer) ve sıcaklık (153 °C) yüzünden dağılmasından önce bulut tepelerinin ancak 160 kilometre aşağısına erişebilmiştir. Muhtemelen, her dev gezegenin troposferi, gazla sıvı arasında hiçbir ayrımın kalmayacağı kadar yüksek sıcaklık ve basınçlarda, akışkan bir iç kesimle iç içe geçmiştir. Elbette, bir insanın üzerinde durabileceği katı bir yüzey yoktur.

Dev gezegenler için temel veriler Tablo 5'te verilmiştir. Dönüş hızının yüksekliğinin şekillerini düzleştirmesi nedeniyle, burada verilen kutup çapları ekvator çaplarının altındadır. Jüpiter'in kutup çapı ekvator çapının % 6,5, Satürn'ün kutup çapı ise % 10 altındadır. Gaz içeriğinin düşük olduğu ve daha yavaş dönen Uranüs ve Neptün içinse bu fark yalnızca % 2 civarındadır (ve yerbenzeri gezegenlerin her biri için % 1'in altındadır).

İç kısımlar

Dev bir gezegenin iç kesimini incelemenin basit bir yolu yok, ama atmosfer bileşimini (% 99 hidrojen ve helyum)

Tablo 5. Dev gezegenlere ilişkin temel veriler. Kütle birimlerinin Tablo 3'te yerbenzeri gezegenler için verilenin bin katı olduğunu unutmayın.

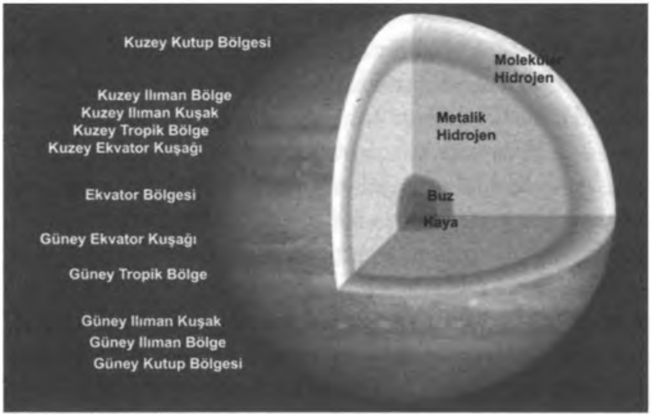
	Kütle/10^{27} kg	**Kutup çapı /km**	**Yoğunluk /10^3 kg m^{-3}**	**Bulut tepesi kütleçekimi /m s^{-2}**	**Bulut tepesi sıcaklığı**
Jüpiter	1,90	133.700	1,33	23,1	-150 ºC
Satürn	0,569	108.720	0,69	9,0	-180 ºC
Uranüs	0,0868	49.940	1,32	8,7	-214 ºC
Neptün	0,102	48.680	1,64	11,1	-214 ºC

ve genel olarak Güneş Sistemi'nin nelerden oluştuğuna dair genel bilgimizi kullanarak, ölçülmüş yoğunluğuyla ve bundan çıkardığımız iç basınçlarla uyumlu bir model oluşturabiliriz. Her dev gezegende, atmosferin altında, "sıvı" ya da "gaz"dan çok "akışkan" demenin daha doğru olacağı bir durumda, çoğunlukla hidrojen moleküllerinden (H_2) ve helyum atomlarından (He) oluşan bir bölge olmalıdır. En merkezde muhtemelen kayalık bir iç çekirdek vardır; Jüpiter ve Satürn'de bu kesim üç Dünya kütlesi, Uranüs ve Neptün'ün içindeyse yaklaşık bir Dünya kütlesi kadardır. İç çekirdeğin çevresinde, Jüpiter içinde yaklaşık Dünya kütlesinin iki katı, Satürn'ün içinde belki altı Dünya kütlesi, Uranüs'ün içinde on iki Dünya kütlesi ve Neptün'ün içinde on beş Dünya kütlesi kadar boyutlarda, bilinmeyen orantılarda su, amonyak ve metandan oluşan, "buz"dan bir dış çekirdek olmalıdır. Bu dış ve iç çekirdeklerin ergimiş mi yoksa katı mı olduklarını bilmiyoruz, çünkü basıncı tahmin edebilsek de (Jüpiter'in merkezinde 50 milyon atmosfer gibi afallatıcı bir düzey), bileşimi bilmiyoruz ve (Jüpiter'in merkezinde 15.000 ^{0}C ve üzeriyle Neptün'ün çekirdeğinin dış kenarında yaklaşık 2.200 ^{0}C arasında değişen) olası sıcaklığa ilişkin ancak belli belirsiz bir fikrimiz var. Metalik demirin kayadan ayrışıp merkeze doğru çökerek bir iç-iç çekirdek oluşturup oluşturmayacağı dahil, maddelerin bu tür aşırı şartlar altında nasıl davrandıklarına ilişkin anlayışımız yetersizdir. Uranüs ve Neptün'ün çekirdekleri ayrışmamış buz ve kaya karışımı bile olabilir.

Çekirdekler için bu sayılar dikkate alındığında, Uranüs ve Neptün'ün hidrojen ve helyum dış kesimleri için, yaklaşık 6.000 kilometre kalınlığında kaplamalar oluşturacak,

bir Dünya kütlesinden biraz fazla bir yer kalmaktadır. Ancak, "gaz devleri" Jüpiter ve Satürn'ün çekirdeklerini saran hidrojen ve helyum örtüleri çok daha derindir; sırasıyla 300 ve 80 Dünya kütlesinin üzerinde. Hidrojenin modellenmesi buz ya da kayaya kıyasla daha kolay ve bilim insanları 2 milyon atmosferden yüksek basınçlarda hidrojen atomlarının iyice sıkıştıklarından ve elektronların artık belli atomların etrafıyla sınırlı kalmadıklarından oldukça eminler. Bunun yerine, ergimiş metal gibi davranabilen bir hidrojen denizinde dolanabiliyorlar. Bu elektron hareketi serbestisi "metalik hidrojen"in olağanüstü bir elektrik iletkeni olmasını sağlar. Jüpiter'in çekirdeğini saran metalik hidrojen kaplama (içinde biraz helyum erimiş olarak) muhtemelen yaklaşık 260 Dünya kütlesi (Jüpiter'in toplam kütlesinin % 80'i) kadardır; Satürn'ün çekirdeğinin etrafındaysa 41 Dünya kütlesi (Satürn'ün toplam kütlesinin % 40'ından biraz fazlası) gibi daha mütevazı bir oran oluşturduğu düşünülmektedir. Şekil 17'de Jüpiter'in tam iç yapısı gösterilmektedir.

Belki Uranüs istisnası hariç, hepsinin uzaya Güneş'ten aldıklarından daha fazla ısı yaydıklarına bakılırsa, dev gezegenlerin iç yapılarının evrimi hâlâ sürüyor olabilir. Jüpiter'in kütlesi çok yüksek olduğundan, oluşumundan bu yana içinde sıkışmış ilksel ısının önemli bir miktarını hâlâ sızdırıyor olabilir, ama Satürn ve Neptün için bu ısı fazlalığı, ısının gerçekten içeride üretiliyor olması gerektiğini göstermektedir. Radyojenik ısı olamayacak kadar büyük bir farktır bu, yani iç ayrışma hâlâ sürüyor olabilir. Ortalamanın üstünde yoğunlukta maddenin içeriye doğru yerleşmesi (ve çevreleyen kaplama incelir, ama saflaşırken, bir iç kaplamanın gelişmesine izin vermesi) kütleçe-



17. Jüpiter içerisindeki tahmini iç katmanlan gösteren kesit plan. Başlıca troposfer bulut tepesi bölgeleri (parlak) ve kuşakları (karanlık) etiketlenmiştir.

kimsel potansiyel enerjiyi ısıya dönüştürecektir. Böyle bir ısı çekirdeklerin (ya da iç çekirdeklerin) büyümesinin sürmesinden ya da, yalnızca Satüm için, helyum damlacıklarının metalik hidrojen katınanının içinde içeriye doğru yerleşmesinden kaynaklanıyor olabilir.

Atmosferler

Bileşim

Dev gezegenlerin iç kesimlerine ilişkin mantıksal spekülasyonların aksine, atmosferlerine ilişkin anlayışımız

gözleme ve ölçüme daha fazla dayanabilmektedir. Bulutların ve üzerlerindeki katmanların bileşimi, farklı dalga boylarındaki güneş ışığının atmosfer içindeki çeşitli derinliklerde nasıl soğurulduğuna ilişkin bilimsel alan olan optik spektroskopi yoluyla ölçülebilir. Ayrıca, her bir derinlikteki ortalama molekül kütlesi, bir uzay aracından aktarılan radyo sinyallerinde, gezegenin arkasında gözlerden kaybolurken görülen sapma miktarıyla da belirlenebilir. Ayrıca, *Galileo* giriş araştırma aracı, alçalışı sırasında Jüpiter'in içinde çeşitli ölçümler yapmıştır. Tablo 6'da dört dev gezegenin atmosferlerinin kimyasal bileşimleri karşılaştırılmaktadır. Burada sıralanan türlere ek olarak, her biri eser miktarda etin (C_2H_2) içerir, Jüpiter'de eten (C_2H_4) ve hem Jüpiter hem Satürn'de fosfin (PH_3), karbonmonoksit (CO) ve german (GeH_4) vardır.

Uranüs ve Neptün'de, en tepedeki sürekli bulut katmanı metan-buzu parçacıklarından oluşur. Jüpiter ve Satürn metan yoğuşması için çok sıcak olduklarından, bunun yerine amonyak-buzu parçacıkları yoğuşarak en üst bulutları oluşturur. Bu üst bulut katmanları yaklaşık 10 kilometre kalınlığındadır ve altlarında "hava" muhtemelen yeniden berraklaşmaktadır. Hesaplamalar, Jüpiter örneğinde, yaklaşık 30 kilometre aşağıda amonyum hidrojen sülfürden (NH_4HS) oluşan ikinci bir bulut katmanı ve bunun da yaklaşık 20 kilometre aşağısında bu kez sudan (tepede buz, aşağıda sıvı su damlacıkları) oluşan üçüncü bir katman olması gerektiğine işaret eder. *Galileo* giriş araştırma aracı yaklaşık olarak doğru derinlikte olası amonyum hidrojen sülfür bulutları bulmuş, ama su-buzu bulutları bulamamıştır. Bazıları modellerin yanlış olduğunu söylüyor; bazılarıysa araştırma

Tablo 6. Dev gezegenlerin atmosferlerinde saptanmış gazlar; her birinin oluşturduğu ölçülmüş oran gösterilmektedir.

	Jüpiter	**Satürn**	**Uranüs**	**Neptün**
Hidrojen (H_2)	0,90	0,96	0,83	0,80
Helyum (He)	0,10	0,03	0,15	0,19
Metan (CH_4)	3×10^{-3}	$4,5 \times 10^{-3}$	0,023	0,015
Amonyak (NH_3)	3×10^{-4}	1×10^{-4}	-	-
Su (H_2O)	4×10^{-6}	$(2 \times 10^{-9}$	-	-
Hidrojen sülfür (H_2S)	$(1 \times 10^{-7}$	$(2 \times 10^{-7}$	-	-
Etan (C_2H_6)	6×10^{-6}	2×10^{-7}	-	$1,5 \times 10^{-6}$
Görünür bulutlar	Amonyum	Amonyum	Metan	Metan

aracının kesintili su-buzu bulutları arasındaki bir açıklığa nüfuz ettiğini. Satürn'de de aynı bulut katmanları beklenmektedir, ama Satürn'ün kütleçekiminin daha düşük olması nedeniyle, aralıklarının üç kat daha fazla olacağı düşünülüyor. Uranüs ve Neptün'ün metan bulutlarının altındaysa amonyum yüklü bulutların olması bekleniyor.

Jüpiter'in amonyum bulutlarının tepesindeki atmosfer basıncı, Dünya'daki deniz yüzeyi atmosfer basıncından iki ya da üç kat düşük, öteki dev gezegenlerdeyse bulut tepesi basıncı, Dünya'nın deniz yüzeyi basıncına yakındır.

Dolaşım

Jüpiter'de ekvatora paralel küresel bir bulut grupları modeli küçük bir teleskopla bile görülebilmektedir. Öteki

dev gezegenlerde de benzer bir model daha küçük ölçekte yinelenir. Atmosferlerinin bu görülür kısımlarının dolaşımında Güneş'in ısısı bir rol oynuyor olmalı, ama, görünüşe bakılırsa, enerjisini daha çok iç ısıdan alıyor ve hızlı dönüşlerinin etkisi altında.

Geleneksel olarak, karanlık gruplar "kuşaklar" ve aralardaki parlak gruplar da "bölgeler" olarak adlandırılır. Jüpiter'deki başlıca kuşak ve bölgelerin adları Şekil 17'de verilmiştir. Referans alınabilecek katı bir yüzey bulunmadığından, dev gezegenlerde rüzgâr hızları gezegenin ortalama dönüş hızıyla göreceli olarak ölçülür. Jüpiter'de bulut tepesi rüzgârı, Ekvator Bölgesi'nin büyük bölümü boyunca, saniyede 130 metreye dek ulaşabilen bir hızla doğuya doğru eser. Kuzey ve Güney Ekvator Kuşakları'nın komşu kenarlarında da bu hareket görülür, ama Tropik Bölgelere ulaşılana dek, her kuşak boyunca ekvatordan uzaklık arttıkça rüzgâr hızı düşer ve sonunda tersine döner; Tropik Bölgelere ulaşıldığındaysa rüzgârın yönü yeniden tersine döner ve kutup bölgelerine dek her kuşak ve bölge boyunca tersine dönüşlerle süreç yinelenir.

Jüpiter'in bölgelerinde atmosfer çoğunlukla yükselir ve bu da yukarılarda, doğal olarak parlak göründükleri yerde amonyum bulutlarının yoğuşmasına yol açar. Kuşaklardaysa, aksine, atmosfer çoğunlukla çöker ve bulut tepelerini daha karanlık göründükleri bir derinliğe doğru aşağı çeker. Jüpiter'de bu modele dair yerel istisnalar saptanmıştır ve genel anlamda yükselen bölgeler ve çöken kuşaklar kuralı, atmosfer dolaşımlarının anlaşılması daha zor öteki dev gezgenler için geçerli görünmemektedir. Bölge ve

kuşakların görünürlüğünü etkileyip karmaşıklığı artıran etmenlerden biri de bulutlara renk katan ve fotokimyasal tepkimelerin sonucu olması beklenen eser miktardaki bileşiklerin mahiyet ve miktarlarının yeterince bilinmemesidir. Jüpiter'in çeşitli sarı ve kırmızı tonlarının kaynağı, (ya hidrojen sülfür ya da amonyum hidrojen sülfürden fotokimyasal olarak çözülen) kükürt, (fosfinden) fosfor ya da (amonyumdan fotokimyasal olarak oluşan, N_2H_4) hidrazin olabilir.

Renk farklılaşmaları Satürn'ün atmosferinde daha küçük ölçektedir ve kuşaklarla bölgeler modeli daha az öne çıkar. Ancak, rüzgâr hızları daha yüksektir; ekvatorun her iki tarafında, 10^0 boyunca, saniyede 400 metreyi aşan, doğuya doğru esen rüzgârlar hâkimdir.

Hem Jüpiter hem de Satürn'de dönen fırtına sistemleri iyi bilinmektedir. Aralarında en ünlüsü, Jüpiter'in Büyük Kırmızı Leke'sidir. Bu sistem Şekil 3'te, Güney Ekvator Kuşağı'yla Güney Tropik Bölgesi arasındaki sınıra oturmuş oval bir yapı olarak görülebilir. Doğudan batıya doğru 26.000 kilometre boyunca uzanır, sarmal bir yapıdadır ve saatin ters yönünde dönüşü yaklaşık altı gün alır. En azından 1830'lardan bu yana teleskopla gözlemlenebilmektedir. Hem Jüpiter (Şekil 7'deki Güney Ilıman Kuşak boyunca bakınız) hem Satürn'de, çeşitli ölçeklerde daha küçük fırtınalar seçilebilmektedir. Yaklaşık olarak her otuz yılda bir, kuzey yarıküresi yazı sırasında ekvatorun yakınlarında beyaz bir nokta olarak başlayan, ama bir ay içerisinde tüm küreyi kuşatacak kadar yayılabilen ve sonra da yavaş yavaş gözden kaybolan dev bir fırtına sistemi Satürn'ün görüntüsünü bozabilmektedir.

Jüpiter ve Satürn sarımsı bir tondayken, Uranüs ve Neptün mavimsi-yeşil renkte görünür. Bunun nedeni, bulut tepelerini, ışığın daha uzun (kırmızı) dalga boylarını soğuran, üstteki bir metan gazı derinliği arasından görmemizdir.

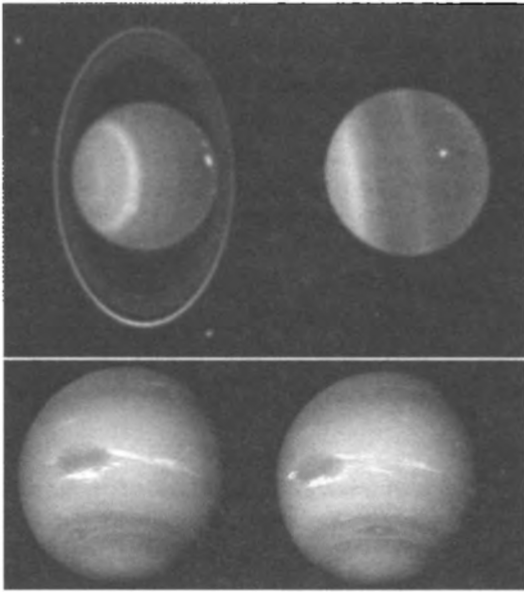
82,1 ^{0}C'lik eksen eğimi nedeniyle, Uranüs'te mevsimsel farklılıklar aşırı düzeydedir. Örneğin, şu ana dek Uranüs'ü ziyaret etmiş tek uzay aracı olan *Voyager 2* 1986'da gezegenin yanından geçtiğinde güney kutbu güneş ışığı içindeydi ve kuzey yarıkürenin büyük bölümü onlarca yıllık bir karanlığa bürünmüştü. *Voyager*'ın görüntülerinde güney yarıküre hayal kırıcı derecede donuk görünüyordu, ama Uranüs yılı ilerleyip Güneş yükselmeye ve daha geniş bir enlem aralığını kapsamaya başladıkça, küre öteki dev gezegenlere daha fazla benzemeye başladı (Şekil 18). Uranüs 2007'de ekinoksundan geçti ve güney kutbu, arkasından aşamalı olarak güney yarıkürenin geri kalanıyla, 2028'de güney kışı ortasında doruğa ulaşacak uzun süreli bir karanlığa kaymaya başladı.

Voyager 2 1989'da Neptün'ün yanından geçip onu ayrıntılı olarak gözler önüne serdiğinde, gezegen Jüpiter'in mavi bir versiyonuna benziyordu. Ekvatorun hemen güneyinde, Jüpiter'deki ünlü kuzenine atıfla "Büyük Kara Leke" denen, kara bir leke şeklinde dev bir fırtına sistemi bile vardı. Ancak, bu sistem daha kısa ömürlü çıktı; 1994'e gelindiğinde kayıplara karışmıştı. Jüpiter ve Satürn'dekinin tersine, Neptün'deki ekvator rüzgâr akımı batıya (gezegenin dönüşünün tersine) doğru eser; Şekil 18'de, Büyük Kara Leke'nin daha küçük, daha güneydeki lekeye göre batıya doğru kayışına baktığınızda bunu görebilirsiniz.

Dev gezegenlerin hepsinin güçlü manyetik alanları vardır. Bir gezegenin manyetik alanının geleneksel ölçütü olan "manyetik dipol momenti" Neptün'de Dünya'nınkinin 25 katıdır. Uranüs'ünki 38, Satürn'ünki 582 ve Jüpiter'inki de 1.949 kat daha büyüktür. Bu alanların oluşabilmesi için her gezegenin bir tür iletken hareketten geçen, elektrik iletkeni sıvı bölgesinin bulunması gerekir. Manyetik alanları bulunan iki yerbenzeri gezegende (Merkür ve Dünya), bunun açıklaması, demir çekirdeklerin akışkan kaplamasıdır. Jüpiter ve Satürn'ün manyetik alanları, muhtemelen, gezegenlerin görece hızlı dönüşlerinin harekete geçirdiği metalik hidrojen katmanında üretilmektedir. Uranüs ve Neptün'de metalik hidrojen için basınç çok düşük olduğundan, manyetik alanlarının açıklanması daha zordur, ama bunun nedeni, muhtemelen, dış çekirdeklerinin elektrik ileten "buz"u içerisindeki harekettir.

Bir gezegenin manyetik alanının bulunmasının (Merkür ve Dünya için de geçerli olan) önemli bir sonucu, gezegeni Güneş'ten gelen manyetik alan hatlarının genellikle nüfuz edemediği bir bölge içinde sarmalamasıdır. Bu bölgeye gezegenin "manyetosferi" denir. Güneş rüzgârındaki yüklü parçacıkların (ağırlıklı olarak protonlar ve elektronlar) yollarını Güneş'in manyetik alanı belirler, ama sonra gezegenin manyetosferinin "yay şoku"na çarparak gezegenden saparlar.

Yüklü parçacıklar, bazen, özellikle de uzun manyetik kuyruktan sızarak, Güneş'ten gezegene ulaşabilirler. Ku-



18. Üstte: Ağustos 1998 (solda) ve Temmuz 2006'da (sağda) Hubble Uzay Teleskobu'nun gördüğü haliyle Uranüs. Gezegenin ekseninin yöneliminde Güneş'e göre değişim, atmosferik gruplaşma örüntüsünden görülebilmektedir. 1998'de, güney kutbu etrafındaki bölge hâlâ güneş ışığı içindeydi, ama 2006'ya gelindiğinde ekseni Güneş'le neredeyse düz çizgiye geçmişti. Halkaların ve iç uydulardan bazılarının da fark edildiği 1998 görüntüsünde, kuzey uçta yüksek, parlak bulutlar görülebilmektedir. Halkalar 2006'da düz çizgide ve görünmezdiler, ama onların yerine düzenli uydulardan birini (Ariel) ve gölgesini görebiliyoruz. Altta: Neptün'ün, 1989'da gezegene yaklaşışı sırasında *Voyager 2* tarafından alınmış iki görüntüsü; neredeyse tam olarak bir gezegen dönüşü arayla kaydedilmişlerdir. Büyük Kara Leke ve bağlantılı yüksek, parlak, nitrojen saçakbulut demetleri göze çarpmaktadır. Genel çizgili yapıya ve daha güneydeki daha küçük bir kara lekeye de dikkat ediniz.

tupların yakınlarında bunlar alan hatları boyunca atmosferin tepesine doğru yönlendirilebilirler ve gökyüzünde, Dünya'da iyi bilinen ve ayrıca Jüpiter ve Satürn'de de gözlenen, "Aurora" adlı ışımalara neden olurlar.

IV. Bölüm

DEV GEZEGENLERİN UYDU VE HALKALARI

Halkalar ve büyük bir uydu ailesi, dört dev gezegenin hepsinde görülen özelliklerdir. Aralarında etki ve ölçek farklılıkları bulunsa da, her halka-uydu sisteminde benzerlikler farklılıklardan fazladır.

Halka-uydu sistemleri

Dev gezegenlerin hepsinin dış uydularının çoğu dış merkezli yörüngelerde, genellikle de gezegenlerinin dönüşünün ters yönünde hareket eder. Dahası, bu yörüngelerin birçoğu, gezegenin ekvatoruna göre ›30^0 eğilimlidir. Kütleçekimlerinin (en fazla 100 kilometre ve daha sıklıkla yalnızca birkaç kilometre uzunlukta olmaları nedeniyle) onları küreselleştiremeyecek kadar düşük olması gerçeğinden ayrı olarak, yörüngelerinin tipik olarak dış merkezli, ters ve eğik olması nedeniyle, bu gökcisimlerine "düzen-

siz uydular" denir. Düzensiz uydular en kalabalık sınıfı oluşturur; son sayımda, Jüpiter'in yörüngesel yarı-büyük eksenleri 105'le 400 Jüpiter yarıçapı arasında değişen 55, Satürn'ün yörüngeleri 184'le 417 Satürn yarıçapı arasında değişen 38, Uranüs'ün 167-818 Uranüs yarıçapında 9 ve Neptün'ün de 223-1.954 Neptün yarıçapı arasında değişen 6 adet bu tür uydusu vardı. "Düzenli uydular", neredeyse dairesel düz yörüngelerde büyük uydulardır, gezegenlerine çok daha yakındırlar ve eğimleri çok düşüktür. Jüpiter'in, yörüngesel yarı-büyük eksenleri Jüpiter yarıçapının 5,9'uyla 26,3'ü arasında değişen 4 adet (Galileo'nun keşfettikleri) bu tür uydusu bulunmaktadır. Bunlar hafife alınamayacak dünyalardır ve jeolojik açıdan yerbenzeri gezegenlerle birçok ortak yönleri vardır, ama, elbette, IAU'nun gezegen tanımına uymazlar. Satürn için sayı 8 (biri hariç hepsi Jüpiter'inkilerden önemli oranda küçük ve yörüngeleri 3-59 Satürn yarıçapındadır) ve Uranüs için 5'tir (5-23 Uranüs yarıçapında). Neptün'ün Triton adında, yörüngesi 14 Neptün yarıçapında ve ters yörüngede değilse "düzenli" olarak görülecek bir büyük uydusu vardır. Triton dahil düzenli uyduların hepsinde görülen ortak bir özellik, gelgit güçlerinin üzerlerinde çok büyük bir etkisi olması nedeniyle senkronize dönmeleri, yörünge başına bir kez dönmeleri ve bu nedenle (Dünya'nın Ay'ı gibi) gezegenlerine hep aynı yüzün dönük olmasıdır.

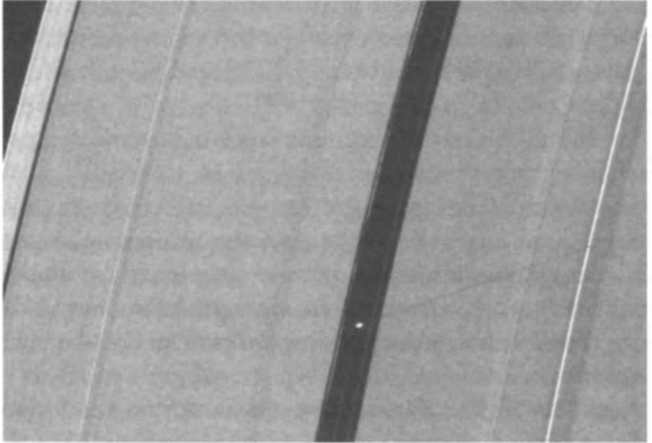
Daha yakınlara baktığımızda, "iç aycıklar" olarak ayrılmaları uygun olacak, düzensiz şekilli döküntü yığınları buluruz. Bunların yörüngeleri dairesel, düz, ekvatoraldir. Halkaları oluşturan parçacıklar da öyledir ve bazı iç aycıkların yörüngelerinin halkalar içerisinde yer aldığı düşünül-

düğünde, büyük bir halka parçacığıyla küçük bir iç aycık arasında muhtemelen hiçbir temel fark yoktur. Jüpiter'in bilinen iç aycık sayısı yalnızca 4'tür, ama Satürn'de, yörüngeleri en iç düzenli uyduların yörüngeleri arasında yer alan 7 tanesi de hesaba katıldığında, sayı 14'tür. Uranüs için sayı 13, Neptün içinse 6'dır.

Halkaların genişlik ve sayıları gezegenden gezegene değişir; aralarında en göz alıcı olanlar Satürn'ün halkalarıdır, ama genel olarak kalınlıkları 20-30 kilometreden fazla değildir. Çoğunlukla, gezegenlerine "Roche sınırı" –içerisinde herhangi bir büyük gökcisminin gelgit güçleriyle parçalanması gereken sınır– olarak bilinen bir mesafeden daha yakındırlar. Halkaların çoğu, gezegene fazla yaklaşmış bir uydu ya da kuyrukluyıldızın, gelgitin saptırmasından artakalmış döküntüsü olarak görülür, ama bazı daha küçük halkaların yakınlardaki uydulardan uzaya savrulmuş ya da çarpma darbeleriyle dışarı atılmış parçacıklardan oluştuğu açıktır.

Satürn'ün halkaları buzdan oluşmuştur ve üzerlerine düşen güneş ışığının yaklaşık % 80'ini yansıtırlar. Etkileyici görünüşlerine rağmen (Şekil 3), içlerindeki maddelerin hepsi bir araya getirilse, ancak 100 kilometre çapında bir gökcismi oluşturabilir. Halka parçacıkları bireysel olarak doğrudan görüntülenmemiştir, ama gezegenlerinin gölgesi üzerlerine düştüğünde, halkaların soğuma hızı, Satürn'ün halkalarının çoğunlukla 1 santimetreyle 5 metre arası boyutta parçacıklar olduğunu gösterir. Jüpiter'in çok daha küçük halkalarıysa, aksine, büyük oranda, yansıtma düzeyi Satürn'ün halkalarındaki parlak buz yığınlarından çok daha düşük olan, mikrometre boyutunda parçacıklardan

oluşur. Uranüs ve Neptün'de halka maddeleri güneş ışığını iyi yansıtmaz (Jüpiter'in halka maddeleri gibi), ama (Satürn'ün halka maddeleri gibi) boyutları çoğunlukla santimetrelerle metreler arasındadır.



19. Satürn'ün halka sisteminin bir parçasının 5.000 kilometre genişliğindeki görüntüsü, 27 Temmuz 2009'da *Cassini* tarafından görüldüğü haliyle. Bu ölçekte, gezegenin (sağda, görüş alanının dışında) etrafındaki halkaların kavisi güçlükle ayırt edilebilmektedir. Halkalar en fazla güneş ışığını, parçacıkların en sıkışık olduğu yerde yansıtır ve parçacıksız boşlukların arasından siyah uzay görülmektedir. En geniş boşlukta, 28 kilometre çapında bir çoban uydu olan Pan görülebilmektedir. Pan bu boşluğun büyük bölümünü temizlemenin yanı sıra, boşluk içerisindeki sığ ve kesintili halkaları da etkiler. Pan'ın gölgesinin sağ tarafındaki halkalar üzerindeki sıradışı uzunluğunun nedeni, bu görüntünün Güneş'in halka düzlemine çok yakın olduğu bir zamanda kaydedilmesidir.

Yörünge rezonansı, halkalarla yörüngeleri bunların arasında yer alan iç aycıklar arasında karmaşık bir kütleçekimi etkileşimine neden olur (Şekil 19). Bazılarının halkalardaki boşlukların birçoğunu temizlemeleri ve ötekilerin de yörüngeleri onların yörüngelerinin hemen içinde ya da hemen dışında bulunan sığ halkalar oluşturmaları, bunların biçimlerini bozmaları ve korumaları nedeniyle bunlara genellikle "çoban uydular" denir.

Genel olarak, halkalar gezegene düzenli uydulara kıyasla daha yakında yer alırlar, ama Satürn, en iç düzensiz uydularından biri olan Phoebe'nin yörüngesinin etrafında merkezlenmiş, karanlık, tozlu maddeden oluşma dağınık bir dış halkasının da olmasıyla, istisnadır. 2009'da, uzaydaki kızılötesi bir teleskopla keşfedilmiş olan bu halkadaki maddelerin henüz anlaşılmamış bir yolla Phoebe'den gelmekte olduğu sanılmaktadır.

Dikkate değer uydular

Bir zamanlar, hemen herkes, dış gezegenlerin uyduları arasından en büyüklerin bile donuk nesneler olmalarını beklerdi. Çarpmaların etkisiyle leke leke olmuş eski buz topları olarak, dış Güneş Sistemi'nin bombardıman tarihini kaydedecekler, ama karşılıklı yörünge evrimini incelemek istemiyorsanız, başka bir ilgi çekici yanları olmayacaktı. 2 Mart 1979'da, California Üniversitesi'nden Stanton Peale (iki meslektaşıyla birlikte) Jüpiter'in en içteki Galileo uyduları Io ve Europa arasındaki tam 2:1'lik yörünge rezonansının Io'nun şeklinde, içini ergitecek düzeyde bir gelgit

çarpıtmasıyla sonuçlanması gerektiğini belirttiği bir bildiri yayımlayana dek, standart görüş buydu. Yoğunluk tahminlerinden ve yüzeylerinin spektroskopla analizinden, ağırlıklı olarak buzdan oluşan öteki uyduların aksine, Io'nun kayalık bir kabuğunun olduğu zaten biliniyordu. Ergime sıcaklığının çok daha yüksek olacağı kayalık bir gökcisminin ergimiş bir iç kesiminin olacağını öne sürmek son derece cüretkâr bir adımdı. Birkaç yıl sonra, *Voyager 1* uydunun yanından geçip tepesinde 300 kilometre yüksekliğinde fışkırma sorguçları bulunan, patlayarak püskürmüş volkanların resimlerini aktarmasaydı, bu iddiaya inanan çıkmayabilirdi.

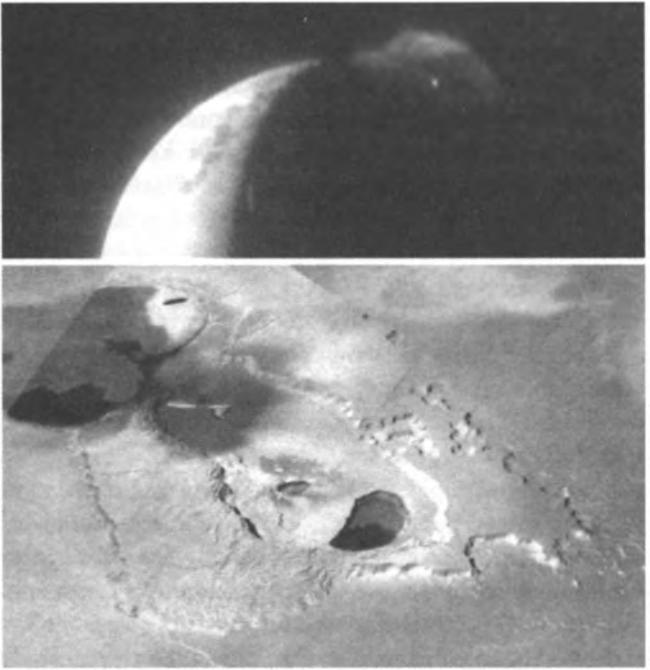
Gelgit kaynaklı ısıtmanın en güçlü olduğu uydu Io olsa da, aynı süreç çeşitli başka uyduları da etkiler ve daha birçokları da eski gelgitsel ısınma dönemlerinin işaretlerini taşır. Bu da çeşitliliklerini artırıp jeologlar açısından ilgi çekici olmalarına yol açar. Çoğunda yalnızca çekirdeğin kayadan oluşmasına ve etrafında kalın bir buz mantosunun, yüzeydeyse belki de kimyasal açıdan ayrı bir buzlu kabuğun bulunmasına aldırmazlar. Dış Güneş Sistemi'ne hâkim olan düşük yüzey sıcaklıkları (Jüpiter'in uyduları için -140 ^{0}C ile Neptün'ün uyduları için -235 ^{0}C arasında) altında, buzun mekanik özellikleri ve ergime davranışı, iç Güneş Sistemi'ndeki kayanın davranışına çok yaklaşır. Diğer bir deyişle, bu gökcisimleri yerbenzeri bir gezegenin hem davranış hem yapısını sergilerler; yalnızca, çekirdekte demir yerine kaya ve kabukla mantoda kaya yerine buz vardır.

Buzsuz ve demir çekirdeğinin etrafı kayalık kabuk ve mantoyla sarılı olan Io istisnadır ve, yörüngesi Jüpiter yerine Güneş'in etrafında olsaydı, yerbenzeri bir gezegen olarak sınıflandırılabilirdi. Europa ise melezdir ve Io'ya benze-

yen, 100-150 kilometre buz altına gömülü bir yapısı vardır. Burada hem bu ikisini, hem de beni en çok etkileyen bazı başka uyduları anlatacak ve daha aktif örnekler üzerinde yoğunlaşacağım, ama kraterlerle lekelenmiş buz toplarının bile bir zamanlar tasavvur edilen sıkıcı kürelerden çok daha ilgi çekici oldukları anlaşıldı.

Io

Io bizim Ay'ımızdan yalnızca biraz daha büyük (çapı 3.642 kilometre) ve yoğundur, ama ikisi birbirlerinden daha farklı olamazlardı. Io'nun arazisi volkanik süreçlerle o kadar hızlı yüzeye çıkmıştır ki, tek bir çarpma krateri bile görülmez; oysa, Jüpiter'in kütleçekiminin başıboş cisimleri içeriye doğru yönlendirmesi, yörüngesi Europa'nın ötesindeki son derece kraterli uyduları Ganymede ve Callisto'ya kıyasla Io'ya daha fazla cismin çarpmasına yol açmalıydı. 1979'da, *Voyager 1*'ın ilk renkli yakın çekim Io görüntüleri incelendiğinde sarı renk tonları, birçoklarını, yüzeyinde fark edilebilen yuvarlak lav akışlarının kükürtten oluştuğunu düşünmeye yöneltti. Ancak, artık Io'nun volkan faaliyetlerinin ergimiş silikat madde (gerçek "kaya") içerdiği kabul ediliyor. Aktif alanlar dışındaki şiddetli soğuğa rağmen, püsküren volkan ağızlarının kalbinde kaydedilen sıcaklıklar 1.000 °C'yi fazlasıyla aşıyor. Dışarı kaçarak Şekil 20'deki gibi patlayıcı püskürmelere neden olan gaz çoğunlukla kükürtdioksittir (Dünya'daysa çoğunlukla su buharı olacaktır) ve hem kükürt hem kükürtdioksit yüzeyde Io'ya rengini veren "don" halinde yoğuşur.



20. Yukarıda: Mart 2007'de, Jüpiter'in yanından geçen, Plüton hedefli *New Horizons* uçuşunun gördüğü haliyle, Io'nun hilal görüntüsünün bir parçası. Gece tarafında, Tvashtar kalderası denen bir yerdeki volkan ağzından çıkan sorguç 300 kilometre yüksekliğine eriştiğinden, üst kısmı güneş ışığı altındadır. Kaynağında güçlü bir parıltı görülebilir ve sorgucun gölgede kalan alt kısmı Jüpiter'den yansıyan ışıkla hafifçe aydınlanır. Altta: Tvashtar'ın sekiz yıl önce *Galileo* yörünge aracıyla görülen 250 kilometre genişliğindeki görüntüsü. Güneş ışığı soldan gelmektedir. En koyu renk madde yakın tarihli lav akışlarıdır ve yukarı sol yakınlarındaki, doğudan batıya uzanan parlak çizgi de bir volkan yarığından püskürmekte olan akkor lavdır.

Io, Jüpiter'in manyetik alanının sınırladığı bir yüklü parçacıklar kuşağı içerisinde yer almaktadır. Burada radyasyon öylesine şiddetlidir ki, NASA'nın *Galileo* uçuşunun denetmenleri uzay aracının Io'ya yeniden yaklaşmasına izin vermediler; bu nedenle, Io'nun ancak küçük bir bölümü, birkaç yüz metrenin altındaki boyutta ayrıntıların görülebileceği kadar iyi görüntülenebilmiştir. En ayrıntılı görüntülerde pikseller yalnızca 10 metre uzunluktadır ve bunlarda bile hiçbir çarpma kraterine rastlanamamıştır.

Io'nun günümüzdeki volkan faaliyetleri düzeyi uzun vadeyi temsil eder nitelikteyse, tüm kabuğu ve mantosu birçok kez geri dönüşmüş olmalıdır. Daha eski yüzeylerin lav akışlarıyla ve püskürme sorguçlarının döküntüleriyle örtülmesi ve küresel düzeyde ortalama olarak yılda birkaç santimetre hızla gömülmesi, çarpma kraterlerinin büyük bir hızla, hiçbiri görünemeyecek şekilde gözden saklanmasına yol açmaktadır. Io'nun bir dış buz katmanı olmuşsa bile, volkan faaliyetleri bu katmanı çoktan buharlaştırmış ve, Io'nun kütleçekimi su buharını ya da başka hafif gazları tutamayacak kadar zayıf olduğundan, uzayda kaybolmasına izin vermiştir. Bir volkan bilimci için ne kadar da büyüleyici bir yer; tabii, haşin radyasyon ortamı Io'nun yüzeyini insan keşiflerine tümüyle düşmanlaştırmış olmasaydı.

Europa

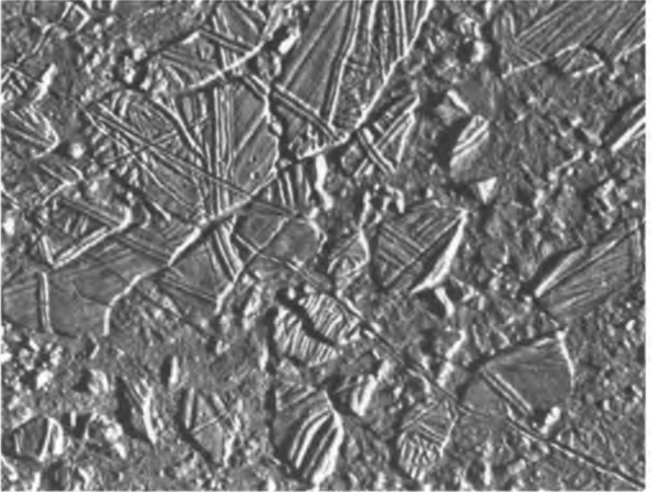
Benim gözdem (3.130 kilometre çaplı) Europa'dır. 1980 ve 1981'de, *Voyager* uydunun yanından geçerken alınan görüntüler yüzeyinin çatlamış yumurta kabuğuna

benzediğini gösteriyor ve pek az çarpma krateri görülüyordu. Gelgit ısısının Europa'nın buzlu dış katmanını Io'daki kadar hızlı olmasa bile bir şekilde yeniden biçimlendirdiği açıktı. *Galileo* uçuşunun daha yüksek çözünürlüklü görüntüleri karmaşık bir yüzey tarihçesini gözler önüne serdi ve alışılmadık derecede sert bir tartışma başlattı. Europa'nın yüzeyinin ağırlıklı olarak su-buzundan oluştuğu zaten gayet iyi bilinmekteydi ve kürenin genel yoğunluğu, buzlu üst kabuğun yaklaşık 100-150 kilometre kalınlığında olması gerektiğini ve altında daha yoğun, kayalık bir iç kısmın bulunduğunu gösteriyor. Ancak, yoğunluk savları, katı buzla sıvı suyu ayırt edemiyor. Düşük sıcaklığı nedeniyle yüzey buzu güçlü ve gevrek. Tartışma, yüzeyin altındaki "buz"un durumu hakkındaydı. Kayaya dek tümüyle donmuş muydu, yoksa alt kısım sıvı halde ve yüzen bir buz kaplamayla örtülü müydü?

İkinci seçenek daha fazla oranda içsel gelgit ısısı ve, ayrıca, buzun altında küresel çapta bir sıvı su okyanusu gibi egzotik bir kavram gerektirmektedir. Bana göre, Şekil 21'deki gibi görüntülerin sunduğu kanıtlar buzun genel olarak ince, yalnızca birkaç kilometre olduğunu ve, dolayısıyla, su üzerinde yüzüyor olması gerektiğini açıkça gösteriyor. Ancak, Galileo'nun Jüpiter sistemindeki yörünge turu sırasında görüntüleme ekibindeki güçlü bir lobi grubu, yıllarca, yüzey özelliklerini kalın buz katmanındaki katı hal ısı taşınımının yönlendirdiği süreçlerin sonucu olarak açıklamaya çalışmakta ısrar etti.

Şu anda Europa'nın jeolojisinin temeli konusunda genel kabul gören görüş, en iyi, Şekil 21'e gönderme yapılarak açıklanacaktır. Burada, 100 metrelik yarlarla kuşa-

tılmış sayısız yüksek buz "salı" görülüyor. Sal yüzeylerinin karakteristik özelliği, çeşitli yönlerde uzanan bir çıkıntılar ve oyuklar örüntüsüdür. Sallar arasında doku daha düzensizdir ve açık bir örüntü gözlenmez. Europa'nın sallara bölünmemiş ve yüzey örüntüsünün kesintisiz çıkıntı ve oyuklar olduğu (bu bölgenin ötesinde) geniş kesitleri var. Şekil 21'deki salların bu türdeki arazinin kırık parçaları olduğu açıktır. Çıkıntı ve oyuk örüntüsünün nedeni, muhtemelen, Europa'nın 3,6 günlük yörünge dönemiyle çakışan bir



21. Europa'nın Conarama Chaos bölgesinin bir parçasının 42 kilometre genişliğindeki yakın çekim görüntüsü; burada, alttaki okyanustan gelen eriyik, bölge yeniden donmadan önce buz salların birbirlerinden ayrılmasına olanak tanımıştır. Güneş ışığı sağdan gelmektedir.

gelgit döngüsünde çatlakların açılıp kapanmasıdır. Küresel düzeyde, herhangi bir zamanda yalnızca birkaç çatlak aktif olacaktır. Aktif bir çatlak (belki yalnızca bir metre civarında bir genişlikte) açıldığında, aşağıdan yukarıya su çıkacaktır. Çatlağın tepesindeki boşluğun soğuğuna geçici olarak maruz kalan su aynı anda hem kaynar hem donar, ama çok geçmeden sulu buzla örtülür. Çatlak kapandığında sulu buzun bir kısmı yüzey üzerinde sıkışarak kapanan çatlak üzerinde bir çıkıntı oluşturur. Çatlağın bir sonraki açılışında çıkıntı yarılır ve çatlak yeniden kapandığında üzerine biraz daha sulu buz eklenir. Birkaç yıllık açılma ve kapanma, merkezdeki oyukların gördüğümüz boyutta çıkıntılarla sarılmasına yetecektir. Sonunda her çatlak kalıcı olarak mühürlenir, ama başka bir yerde yeni bir çatlak işlemeye başlar ve böylece örüntü gelişerek Europa'nın büyük bölümünü kaplayan çıkıntılı ve oyuklu araziye bir ip yumağına benzetilmiş olan bir görüntü kazandırır.

Şekil 21'de, Europa'yı etkileyen öteki büyük süreç, "ip yumağı" araziyi bozmuştur. Bu "eriyik"tir ve "kaos" olarak tanımlanan, düzensiz bir kırık buz salları karışımıyla sonuçlanır. Gelecekteki bir kaos bölgesinin altında okyanus –belki okyanus tabanındaki silikat volkan püskürtüleri yüzünden– alışılmadık derecede ısınır, yüzeydeki buz kaplamanın tabanı yavaş yavaş erir ve böylece buz incelir. Zamanla erime yüzeye ulaşır ve buz salları (ya da yüzer buz kütleleri) buz kaplamanın kenarlarından koparak açıktaki okyanusa sürüklenir. Açığa çıkan su çabucak yeniden donacaktır ve belki de kilometre kalınlığında buz sallarının, Dünya'nın Kuzey Buz denizinde yazın yüzen buzların çözülmesindeki gibi, gerçekten de açık su yerine sulu buzla

kaplı bir denize sürüklendiğini düşünmek daha iyi olacaktır. Şekil 21'in kuzeybatı kısmında salların birçoğunun ilk başta nasıl birbirlerine uyduklarını görebilirsiniz; birbirlerinden yeterince uzaklaşmadıklarından, "ip yumağı" dokuları birbiriyle eşleştirilebilir.

Geçici ısı fazlası ortadan kalktıktan sonra okyanus yeniden donar ve sallar artık sürüklenmez. Yeniden donan deniz yüzeyindeki ve salların altındaki buz yeniden kalınlaşmaya başlar. Yeniden donan alan yeterince kalınlaşıp gevrekleştiğinde yeni çatlaklar açılabilir ve yeni bir "ip yumağı" kuşağı dokusu tüm bölgeye damgasını vurmaya başlar. Şekil 21'de, iki tarafında dar birer çıkıntı bulunan, çaprazlama uzanan genç bir çatlak vardır. Salları aştığı yerlerde sıradan görünür, ama sallar arasındaki yeniden donmuş denizi kestiğinden, genç olması gerektiğini anlayabilirsiniz.

Bu öykü birazcık olsun bile doğruysa, düşünmeye değer imaları olacaktır. Alttaki kayayla kimyasal tepkimeler okyanusu tuzlandıracaktır – gerçi en bol miktardaki erimiş tuz, Dünya'nın okyanuslarındaki gibi, sodyum klorürden çok, magnezyum sülfat olabilir. Gelgitlerle ısınan kayanın üzerindeki bu tür herhangi bir okyanus, Dünya'da yaşamın başladığına inanılan habitatla eşdeğer bir yaşam habitatı sunar. Yerel besin zincirinin en altındaki "ilksel üreticiler" enerjilerini denizaltındaki sıcak kaynakların (hidrotermal ağızlar) okyanusa getirdiği kimyasal dengesizlikten alacaklarından, güneş ışığının yokluğu engel oluşturmayacaktır. Bu tür yaşama, fotosentetik yaşamın aksi olarak, kemosentetik yaşam denir. Dünya'nın okyanus tabanlarındaki en sıcak ağızlara, ağız sıvısı okyanus suyuna karıştığında

oluşan metal sülfit parçacıklar sorgucu nedeniyle "kara bacalar" denir. Bu ağızlar, (karides ve yengeç kadar ileri olanlar dahil) organizma topluluklarının, enerjilerini karbondioksiti metana dönüştürerek elde eden kemosentetik mikroplardan beslendiği, şaşırtıcı yaşam vahalarıdır. Dünya'da yaşam böyle bir ortamda başladıysa, neden Europa'da da başlamasın?

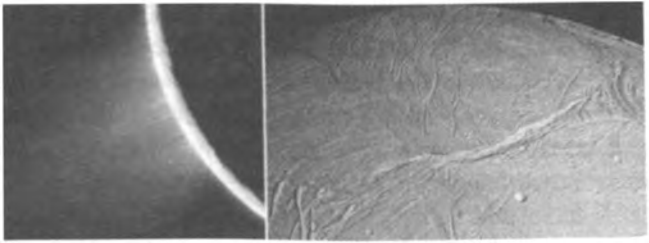
Normalde kilometrelerce kalınlıkta olan buzun altına hapsolmuş yaşamın bulunması son derece zor olacak, Europa'ya inenlerin bir "kara baca" sorgucuna yönelebilecek robot bir denizaltı sondası indirmek için buzda bir delik açmalarını ya da onu eritmelerini gerektirecektir. Ancak, genç bir çatlağın her iki yanındaki çıkıntılar okyanustan sıkıştırılmış sulu buzdan oluşmuşsa, böyle hırslı bir çabaya gerek kalmayabilir. Çatlak açıkken, bitkiler ya da (daha makûl bir varsayımla) deniz yosunları gibi fotosentetik canlılar için bir niş sağlayabilir. Dünya'daki yaşam gibi bunlar da kemosentetik atalardan evrimleşmiş olabilirler. Radyasyon nedeniyle, açıktaki su sütununun en üst birkaç santimetresi yaşanır nitelikte olmayacak, ama sonraki birkaç metrede fotosentez için yeterince güneş ışığı olacaktır. Güneş ışığıyla yaşayan ilksel üreticiler (bitkiler, suyosunları) varsa, onlarla beslenen hayvanlar da olabilir. Bunu bulmak için atılacak ilk adım, bir çatlak tarafından sıkıştırılmış çıkıntıdan alınma bir örneği incelemek olacaktır.

Dış Güneş Sistemi keşiflerinde bir sonraki büyük NASA-ESA işbirliği, büyük olasılıkla, Jüpiter sistemine yolculuk olacak. Bu yolculuğun başlıca hedefi, buza nüfuz edebilen radar kullanarak ve gelgitsel esneme miktarını

(anakaya üzerinde duran "kalın" buz durumunda yalnızca bir metre kadar, ama okyanus üzerinde yüzen "ince" buz kaplama için yaklaşık 30 metre olacaktır) ölçerek, Europa'nın okyanusunun varlığını doğrulamak. Yere inecek bir araç ne yazık ki henüz tasarlanamıyor, ama, en azından, yörüngeden itibaren çıkıntı maddelerinde biyojenik moleküller arayabilecek yüksek çözünürlüklü spektroskopi kullanma olanağı bulunacak.

Enceladus

Europa'nın buzundan yüzeye inmeye gerek kalmadan örnek alınabilmesi durumunda, yaşam işaretleri bulmak çok daha kolay olacaktır. Satürn'ün uydularından biri olan Enceladus tam da bu fırsatı sunuyor. Çapı yalnızca 504 kilometre ve yoğunluğu da çok fazla kaya içeremeyecek kadar düşük. *Voyager* onun bazı kısımları yoğun kraterli, ama başka yerleri görünüşe bakılırsa kratersiz, tuhaf, küçük bir dünya olduğunu gösterdi. 2004'te, Satürn sistemini yörüngeden incelemeye başlayan *Cassini*'nin aktardığı yüksek çözünürlüklü görüntüler, birçok çatlak ailesiyle bölünmüş bir yüzey gösteriyor (gerçi bunlar Europa'nın "ip yumağı" bölgelerine benzemiyorlar). *Cassini*, ayrıca, Güney Kutbu yakınlarındaki çatlaklardan uzaya fışkıran buz kristalleri de keşfetti (Şekil 22). Şansımıza, *Cassini*'de iyonları ve nötr parçacıkları inceleme amaçlı bir kütle spektrometresi vardı ve böylece uzay aracının yolu sorgucun içinden uçup bazı örnekler alabilmesi için değiştirildi. Örneklerin su, metan, amonyum, karbonmonoksit ve karbondioksit



22. Enceladus'un *Cassini* tarafından alınmış iki görüntüsü. Solda: yüzeyin en az 100 kilometre yukarısına uzanan bir sorgucu gösteren, uzun pozlanmış hilal görüntü. Sağda: Enceladus'un bir bölümünden eğik görüntü; bu bölge, sorgucun kaynaklandığı bilinene benzer birçok çatlak ailesiyle bölünmüştür. Birkaç küçük çarpma krateri (*Voyager*'ın göremeyeceği kadar küçükler), bu bölgenin muhtemelen artık aktif olmadığını gösteriyor.

içerdikleri görüldü. Muhtemelen, bazı basit organik moleküller de vardı; gerçi, bu, birbirlerine bağlı karbon atomları için kullanılan kimyasal bir terimdir ve biyolojik kökene işaret etmez. Sorguçlar önceden bilinseydi, *Cassini*'nin kargosuna yaşam işaretlerinin saptanmasına daha uygun aletler de eklenebilirdi.

Satürn'ün hemen önceki uydusu Dione'yle arasındaki yörünge rezonansının kışkırttığı gelgit ısınmasının çatlak oluşumunu tetiklediği ve sorguçlar için itici güç sağladığı neredeyse kesindir. Ancak, kimse Enceladus'un bu denli aktif olmasını beklemiyordu ve, benzer boyutlardaki komşusu Mimas'ın hiçbir faaliyet tarihçesi sergilemeyen arketipik bir kraterli buz topu olması karşısında, bu durum özellikle şaşırtıcıdır. Enceladus'un yüzeyinin altında gizli bir küresel okyanusunun olması mümkün görünmüyor,

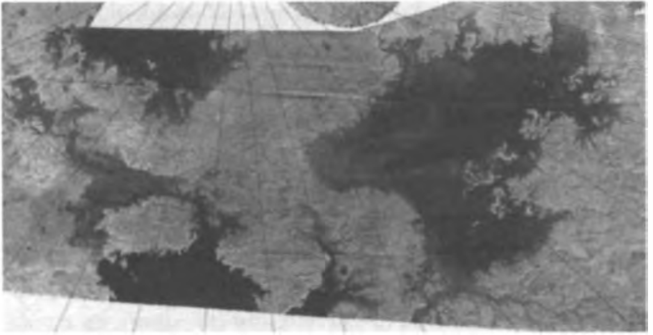
ama sorguç kaynaklarının altında sıvı su zarfları olabilir. Sıvı su yaşam için iyidir, ama, Enceladus içindeki mevcut besinler Europa gibi büyük bir gökcismine kıyasla elbette çok daha kısıtlı olduğundan, Enceladus pek de ümit vaat eden bir habitat gibi görünmüyor.

Titan

Titan, Satürn'ün, ölçek açısından Jüpiter'in Galileo uydularına rakip çıkabilecek tek uydusudur (çapı 5.150 kilometre). Yoğun bir atmosferi olduğundan –uydular arasında bu tür tek örnektir– *Voyager* onu yalnızca bulanık bir portakal topu olarak gösterdi. Atmosfer % 97 nitrojenden oluşmaktadır, ama metan ve stratosferi mat bir pusa dönüştüren fotokimyasal türevleri onu matlaştırır. Titan'ın buzdan (çoğunlukla su-buzu) oluşan kabuk ve mantosu, yarıçapının dış üçte birini kaplar ve kayalık bir çekirdeğin üzerindedir. Demir bir iç çekirdek olabilir; bu durumda, ortalama küresel yoğunluğun dengelenmesi için, buz mantonun tabanının daha derin olması gerekecektir. Titan'ın dönme periyodu mevsimsel rüzgârlardan etkilenir ve bu da bize litosferin iç kısımdan, büyük olasılıkla bir iç okyanus tarafından ayrıştırılmış olması gerektiğini göstermektedir. Bu okyanus büyük oranda su ya da su ve (saf suya kıyasla çok daha düşük sıcaklıkta sıvı halini koruyabilen) amonyum karışımı olabilir. Modellerin çoğunda, iç kayanın hemen üzerine değil, buzlu mantonun *içerisindeki* bir katman olarak yerleştirilir.

Cassini uçuşunda Titan'ın yüzeyinin görülmesi sorunu üç yöntemle çözüldü: kızılötesi-yakın tayfın bazı dar ku-

şaklarında, pus matlığının en düşük olduğu yerlerde yüzeyin bulanık, ama kullanılabilir görüntülerini aldı, *Magellan* Venüs yörünge aracı gibi, görüntüleme radarı kullanarak, bulutlara rağmen yeri görüntüledi ve *Huygens* adındaki iniş aracı paraşütle yüzeye inerken bulutların altından görüntü elde etti. Titan'ın bu görüntüleme teknikleriyle gözler önüne serilen yüzey jeolojik süreçleri, Dünya'da oluşan birçok sürece çok benzer. Kabuk ağırlıklı olarak su-buzudur, Titan'ın -180 °C'lik yüzey ortamı nedeniyle çok katıdır ve kaya davranışı sergiler. *Huygens* ekvator yakınlarında, çakıl taşlarıyla kaplı kumlu bir düzlükte durdu. Burası, hem kumun hem çakılların buzdan oluşması dışında, Mars'a benziyordu. Kum rüzgârla taşınmış olabilirdi; gerçekten de, radar görüntüleri, Titan'ın başka bölgelerinde rüzgârla taşınmış geniş kumul alanları gözler önüne seriyor. Ancak, çakıl taşları akan sıvıyla taşınmış olmalı ve Titan'ın atmosfer bileşimi ve yüzey sıcaklığı düşünüldüğünde bu sıvı metan (CH_4) ya da etan (C_2H_6) olmalı. *Huygens* inişi sırasında iniş alanı yakınlarında dallanan drenaj kanalları gördü ve radar görüntüleri buzlu kabuk "anakaya"sının açıkta olduğu ve tortu birikmiş alçak düzlüklere aktığı tepelerden başlayarak başka birçok bölgede de karmaşık vadi sistemlerini gözler önüne seriyor. Daha da iyisi, her iki kutbun yakınlarında etan da içeren sıvı metan gölleri buldu (Şekil 23). Bazı göl yatakları kuruydu, ötekilerinse kenarları sığ ya da bataklıktı ve mevsimsel farklılık göstermeleri olasıdır. Titan'ın jeolojik açıdan aktif olduğu açıktır. Birkaç fazlasıyla aşınmış çarpma krateri fark edilmiştir ve buzlu "magma"nın Dünya'daki lav akışlarına benzer biçimde püskürdüğü



23. *Cassini*'nin radar görüntülerinden, Titan'ın kuzey kutbu yakınlarındaki 1.100 kilometre uzunluğunda mozaik. Koyu renk bölgeler göllerdir; aralarından en büyüğü 100.000 kilometrekareyi aşar ve Kuzey Amerika'daki Lake Superior'dan % 20 daha büyüktür. Gölleri besleyen dallı drenaj kanalları görülebilmektedir. Boylam çizgileri sonradan eklenmiştir; boş bölgeler görüntülenmemiştir.

"soğuk volkan faaliyetleri"nden kuşkulanılan bazı alanlar vardır.

Soğuk volkanik faaliyetlerin ve tektonik süreçlerin Titan yüzeyinin biçimlenmesine ve yeniden yüzeye çıkmasına ne oranda katkıda bulunduğu bilinmemektedir. Ancak, (bu örnekte elbette buz olan) anakaya erozyonunun ve arkasından gelen tortu aktarımı ve birikiminin başlıca oyuncular olduğu açıktır. Titan'da yağmur, Dünya'daki yağmur gibi yere nüfuz eden ve akarsu ve nehirlerin kaynaklarını besleyen metan damlacıkları içeriyor olmalıdır. Metanın buz "anakaya"yla kimyasal etkileşime girme kapasitesi, aşındırma gücü, yeniden buharlaşıp atmosfere karışma hızı ve yeniden yağmadan önce orada ne kadar kaldığı yine belli

değildir. Bütün bunlar, Dünya'nın hidrolojik döngüsüne benzeyen bir metanolojik döngünün etmenleri olmalıdır. Uzun zaman önce Mars'ta yağmur, nehirler ve göller vardı, ama Titan bunların günümüzde görüldükleri tek yerdir. Bir gün Titan'ı daha ayrıntılı olarak inceleyecek –belki pusun altına sürüklenerek, ilgi çeken yerlere dokunabilmesi için havada durma kapasitesi değişken olan bir balonu da içeren– yeni bir araştırma aracı göndereceğiz. Böyle bir uçuşla göl sıvısından örnek alınabilir ve bize tümüyle yabancı bir sahili döven dalgaların resimleri elde edilebilir.

Miranda ve Ariel

Titan'ın günümüzdeki soğuk volkanik faaliyetleri konusu hâlâ tartışmalı olsa da, Uranüs'ün yüzey sıcaklıkları -200 ^{0}C düzeyindeki iki düzenli uydusunda, Ariel ve Miranda'da geçmişte soğuk volkanik faaliyetler yaşandığından kuşku bulunmamaktadır. Ocak 1986'da, Uranüs sisteminden geçen *Voyager 2*'nin yolladığı görüntülerde bunların etkileri görülebilmektedir.

Ariel iki uydu arasında daha büyük olanıdır (çapı 1.158 kilometre). Karmaşık bir küredir ve en eski kraterli arazisi, yüksek blokları kuşatan sayısız fayla bölünmüştür. Fayların çoğu, "chasma" tanımlayıcı adıyla bilinen türde, düz zeminli vadileri belirler. Ancak, derin yükseklik yüzeyinin korunması yerine, chasma'ların çoğunun zeminleri yumuşak malzemeyle ya da en azından Voyager görüntülerinin 1 kilometrelik çözünürlüğünde yumuşak görünen malzemelerle kaplıdır.

Muhtemelen, uzak geçmişte (2 milyar yıldan fazla bir süre önce) gelgit ısınması Ariel'in yüzeyinin çatlamasına ve soğuk volkanik faaliyetlerin ürünü lavın sızmasına yol açmıştır. Bu lav chasma'ların zeminlerini kaplamıştır ve bazı yerlerde bunların ötesine yayılıp daha eski bazı çarpma kraterlerini kısmen örttüğü görülmektedir. Uranüs'ün Güneş'ten uzaklığı düşünüldüğünde, buzunun Jüpiter'in uydularında bulunan hafifçe tuzlu buzdan çok daha karmaşık bir kokteyl olması beklenmektedir. Kısmi erimenin dışarı çıkarması en olası eriyik, 2:1 su ve amonyum karışımıdır. Bu karışım -100 ^{0}C'de sıvılaştığından, saf suyun erimesi için gerekenden çok daha düşük bir ısınmayla üretilebilir.

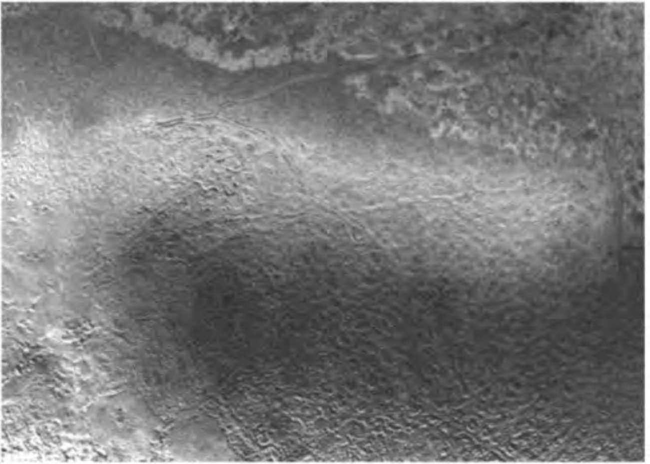
Uranüs'ün en küçük düzenli uydusu olan (çapı 472 kilometre) Miranda'da da bireysel "lav" akışları görülebilmektedir. Böylesine küçük bir gökcismine göre yüzeyi kayda değer derecede, muhtemelen Enceladus'tan daha fazla çeşitlilik içerir, ama yüzeyinde oluşmuş çarpma krateri sayısı, son faaliyetinin muhtemelen milyarlarca yıl önce yaşandığını göstermektedir. *Voyager 2* kürenin yalnızca yarısını görebilmiştir. Bunun yarısı son derece kraterli, ama kraterlerin çoğunun (daha eski olanların) sanki yukarıdan düşen bir şeyle kaplanmışçasına pürüzsüz profilli ve yalnızca genç kraterlerin dokunulmamış halde olması açısından alışılmadıktır. Görüntülenen alanın öteki yarısı, hale olarak tanımlanan, keskin kenarlı üç arazi biriminden oluşur. Üçü de birbirlerinden farklıdır, ama hepsi, kriyovolkanik lav akışları (muhtemelen, Ariel'deki gibi, su-amonyak lavı) olarak tanımlanmış yüzey özellikleri dahil, karmaşık çıkıntılı ya da değişken örüntülü arazi içerirler ve yoğun

kraterli arazilerdekine eşdeğer, bozulmamış kraterlerle kaplıdırlar.

Miranda hakkında, her bir halenin felaket düzeyinde küresel parçalanmaya ve yeniden oluşuma ait bir parçayı temsil ettiği yönündeki erken bir kuram çürütülmüştür. Haleler, büyük olasılıkla, yalnızca zayıflama evresinin fark edilebilir akış benzeri izler bıraktığı soğuk volkanik faaliyet alanlarıdır. Halelerin ötesindeki arazide bulunan daha eski kraterlerin üzerlerinin örtülmüş olması, uzaya bazıları kar benzeri bir biçimde yerleşip önceki topografiyi örtmüş buzlu parçacıklar püskürtmüş, patlayıcı nitelikteki püskürmelere işaret ediyor olabilir. Bunun ne zaman ve neden olduğunu bilmiyoruz. Uranüs'e yeni bir uçuş yapılana kadar öğrenmemiz de mümkün görünmüyor ve bu da yüzyıl ortasından önce olası değil.

Triton

Triton, Neptün'ün en büyük uydusudur (çapı 2.706 kilometre). Dış kısmı buzludur, ama önemli düzeyde bir kayalık çekirdeği olacak kadar yoğundur. *Voyager 2* 1989'da Triton'un yanından geçtiğinde, donmuş nitrojenden kutup takkeleri buldu (bunlar daha önce Dünya'dan, spektroskopi yoluyla saptanmıştı). Mars'ın kutup takkelerindeki karbondioksit gibi bunlar da yazın, erimeden çok uçunum yoluyla muhtemelen küçülerek, Triton'un büyük oranda nitrojenden oluşan ince, ama hatırı sayılır atmosferine içeriklerini eklerler. Triton'un kabuğunu oluşturan sabit anakaya buzu metan, karbondioksit ve su karışımı



24. Triton'un 2.000 kilometre genişliğinde bir bölgesini kapsayan *Voyager* görüntüleri mozaiği. Güney tepeye doğrudur ve güneş ışığı sağ yukarıdan gelmektedir. Güney kutup takkesinin engebeli kenarı, görüntünün üst kısmı boyunca çaprazlama uzanmaktadır. Uzun, dar, kavisli çıkıntılar (oluklar), soğuk volkanik faaliyetlerde magmanın püskürdüğü yarıklar olabilir. Sol alttaki pürüzsüz düzlük ve çanaklar, muhtemelen, geniş soğuk volkanik faaliyet alanlarıdır. Ortadaki ve sağ alttaki gamzeli alana, kavun kabuğuna ilişkin görsel bir benzetmeyle "kantalup arazi" denir, ama nasıl oluştuğu bilinmemektedir.

gibi görünmektedir. Ayrıca, optik spektroskopiyle neredeyse hiç görülemeyen amonyum da olabilir.

Triton'un en iyi görüntülerinin çözünürlüğü piksel başına yaklaşık 400 metre civarındadır. Kutup takkesinin ötesinde, soğuk volkanik faaliyetlerle yaratılmış olabilecek çeşitli arazi şekilleri de içeren, jeolojik açıdan karmaşık bir

yüzeyi gözler önüne sererler (Şekil 24). Çarpma kraterlerine her yerde rastlanır, ama sayıları çok yüksek değildir ve yüzeyin büyük bölümünün yaşının bir milyar yılın altında olması mümkündür. Triton, kutup takkesi arasından püsküren ve yaklaşık 8 kilometre yüksekliğe dek koyu renk parçacıklar fışkırtan gayzerlerin bulunması açısından da olağanüstüdür. Bizim atmosferimizdeki saçakbulutlara benzeyen, nitrojen kristallerinden oluşma birkaç yüksek irtifa bulutu da vardır.

Kuzey yarıkürenin büyük bölümü karanlıkta olduğundan, *Voyager 2* yalnızca güney kutup takkesini görebilmiştir. Neptün'ün 29,6^0 eksen eğikliğinin ve Triton'un yörüngesinin 21^0 eğiminin sonucunda, Triton'un mevsimleri kendine özgüdür. Üstelik, Triton'un yörünge düzleminin Neptün ekseninde yarattığı devinim nedeniyle Triton'daki tam bir mevsim döngüsü Neptün'ün 164 yıllık yörünge süresine değil, 164 yıllık alt döngüler içeren 688 yıllık bir döngüye eşittir. Tam döngü sırasında Triton'daki güneşaltı irtifa 50 °C kuzeyle 50 °C güney arasında değişir. Rastlantı eseri, *Voyager 2*'nin yanından geçtiği sırada Triton güney yarıküre yazının zirvesine yaklaşmaktaydı ve Güneş yaklaşık 50^0 güneydeydi; bu yüzden kuzey yarıkürenin büyük bölümü karanlıktı ve görülemiyordu. Güneşle aydınlanan güney kutup takkesi gerileme işaretleri sergilemekteydi ve 1997'de Dünya'dan gerçekleştirilmiş, Voyager geçişinden sonraki sekiz yılda atmosfer basıncının iki katına çıktığını gösteren gözlemler, kutup takkesinin gaza uçunumunu teyit etti. Bu arada, atmosferdeki nitrojen soğuk yüzey üzerinde yoğuşurken, görünmeyen kuzey kutup takkesi muhtemelen büyümekteydi.

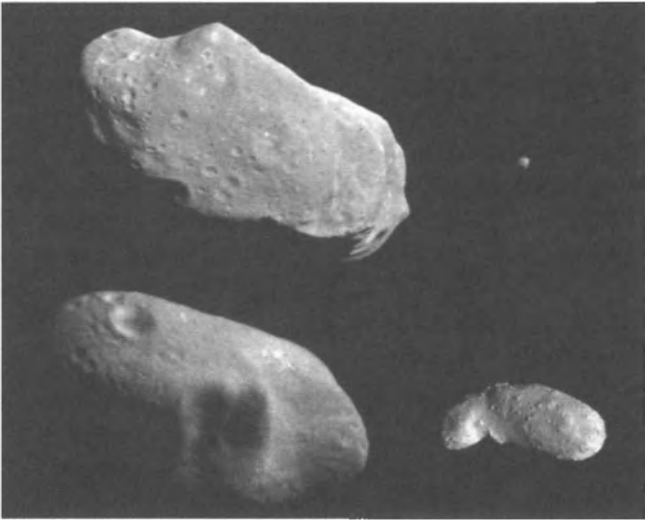
V. Bölüm

ASTEROİTLER

Gezegenlerle ilgili hiçbir kitap asteroitler tartışılmadan tamamlanmış sayılmaz, çünkü bunlar, (asteroit çarpmalarının kuyrukluyıldız çarpmalarından yaklaşık on kat fazla görüldüğü) iç Güneş Sistemi'ndeki gezegenlere en sık çarpan nesnelerdir. Ayrıca, en büyük asteroit Ceres resmi olarak cüce gezegen sınıfına alınmıştır.

Biçimler, boyutlar ve bileşimler

Ceres, NASA'nın *Dawn* uzay aracının hedefidir; Temmuz 2011'den başlayarak, yılı kütlesi en yüksek ikinci asteroit olan Vesta'da geçiren *Dawn*, 2015'te de Ceres yörüngesinde beş ay geçirecek. Birkaç daha küçük asteroit uzay araçlarınca zaten ziyaret edilmiş ve biçimlerinin düzensizliğini doğrulayan görüntüler elde edilmiştir (Şekil 25). Onlarca metreyle birkaç yüz kilometre arasında herhangi bir boyutta, çopur görünüşlü bir patatesi gözünüzün önünde canlandırırsanız, tipik bir asteroidin işe yarar bir görüntüsü



25. Farklı ölçeklerde asteroitlerin görüntüleri. Yukarıda: 54 kilometre uzunluğunda bir ana kuşak asteroidi olan Ida, sağında küçük uydusu Dactyl'le birlikte. Sol altta: Dünyaya yakın, 33 kilometre uzunluğunda bir asteroit olan Eros. Sağ altta: Dünya'yla kesişen, 0,5 kilometre uzunluğundaki Itokawa adlı asteroit. Ida ve Eros'un üzerinde birçok çarpma krateri görülebilmektedir, ama çok daha küçük olan Itokawa kayalarla adeta dövülmüştür.

aklınızda oluşacaktır. Asteroitlerin parlaklığında teleskoplarla gözlenmiş periyodik varyasyonlar, dönüşlerinin çoğunlukla yalnızca birkaç saat aldığını göstermektedir. Genel olarak, uzunluklarına göre sağ açıda ve bu nedenle de bir kokteyl çatalına takılmış sosisler gibi dönerler.

Yaklaşık olarak her 50 asteroitten 1'inin muhtemelen kendi uydusu vardır ve 1993'te *Galileo* yanından geçtiğin-

de bir uzay aracının ziyaret ettiği ikinci asteroit olan Ida'nın da bunlardan biri olduğu ortaya çıkmıştır. İlk doğrulanmış asteroit uydusu keşfiydi bu, ama sonradan, Dünya atmosferinin titrek ışığını telafi etme amaçlı, uyarlanmalı optik gibi ileri teleskopik teknikler kullanılarak, bu türde daha birçok örnek bulundu. Asteroitlerin uydularının boyutları görece küçükle asıl asteroide benzer büyüklükler arasında değişir. Aslında, Antiope adlı asteroit, görünüşe bakılırsa, birbirlerinin etrafında dönen, merkezleri yalnızca yaklaşık 170 kilometre uzaklıkta, 110 kilometre boyutta, birbirlerinden ayırt edilemez iki gökcismi içermektedir. Şu ana dek her birinin iki küçük uydusu bulunan iki asteroit bilinmektedir. Bazı asteroit uyduları bir çarpışmadan kalmış parçacıklar, bazılarıysa asteroide yakalanmış nesneler olabilmektedir. Nesnelerin uçup uzaklaşmaktansa yörüngeye girmesi zor olduğundan, iki durum da kolayca açıklanamamaktadır.

Asteroit yoğunlukları 1,2'yle 3,0 g/cm^3 arasında ölçülmüştür. Ancak asteroit parçaları oldukları açık taş göktaşlarının yoğunlukları yaklaşık 3,5 g/cm^3 ve taş-demir göktaşlarının yoğunlukları 5,0 g/cm^3'e yakındır, yani ölçülen asteroitlerin hiçbiri parçalanmamış bir cisim olamaz. Daha çok, gözenekli enkaz yığınları olmalıdırlar. 2005'te Japon araştırma aracı *Hayabusa*'nın ziyaret ettiği Itokawa (Şekil 25) gibi bazıları ve şekilleri radarla saptanmış olan bazı başka asteroitler, dar bir belde birleşmiş iki ana kütle içeren "temas çiftleri" gibi görünmektedir. Ancak, Itokawa'nın yüzeyinin büyük bölümünü kaplayan sayısız kaya parçası, iki ana kütlenin de birçok parçadan oluştuğunu göstermektedir.

Asteroitlerin belirgin renkleri yoktur, ama yansıtma tayflarına göre çeşitli sınıflara ayrılabilirler. Başlıca üç tip bulunmaktadır. S tipindekiler silikatlı kaya özellikleri sergilerler ve taşlı göktaşlarıyla aynı malzemeden oluştukları açıktır. Yörüngeleri Güneş'ten yaklaşık 2,0 ve 2,6 AB arası uzaklıktaki asteroitlerin çoğunluğunu bunlar oluşturur; 2,6'yla 3,4 AB arasındaysa en yaygın tip, karbonlu kondrit göktaşı özellikleri sergileyen C tipidir. 3,4 AB ötesinde, asteroitler genellikle koyu renk ve az çok kırmızı renktedirler. Bunlara D tipi denir ve renklerini güneş ışınımına uzun süre maruz kaldıkları (uzay aşınması) sırada karbonlu maddeden oluşan katransı yüzey kalıntısından alıyor olabilirler. Bu katransı maddeler, genellikle, Amerikalı gökbilimci Carl Sagan'ın (1934-96) eski Yunanca "çamur" anlamındaki sözcükten ürettiği "tolinler" terimiyle anılır.

Şuraya buraya dağılmış olarak, büyük oranda metalik görünen (M-tipi), demir göktaşlarıyla açıkça akraba asteroitler ve, ayrıca, başta V-tipi tanımlamasını aldıkları Vesta olmak üzere, yüzeylerinde bazalt var gibi görünen birkaç asteroit de bulunmaktadır. Bunların ya da artık parçalanmış olan anne gökcisminin bir zamanlar içsel ergimeye ve volkan püskürmelerine olanak tanıyacak kadar sıcak olmaları mümkündür.

Asteroitlerin yörüngeleri

Bilinen asteroitlerin çoğunun (bunlar, Ay'ın kütlesinin yaklaşık % 4'üne eşdeğerdir) yörüngeleri Mars ve Jüpiter'in yörüngeleri arasında, "asteroit kuşağı" denen

yerdedir. 3.000'in üzerinde ana kuşak asteroidi belgelenmiştir. Bunların toplam kütlelerinin yarıdan fazlasını, sırasıyla 950, 530, 540 ve 430 kilometre çaplı dört en büyük örnek, yani Ceres, Vesta, Pallas ve Hygeia içerir (Vesta Pallas'tan daha yoğun olduğundan, biraz daha küçük olmasına rağmen, kütlesi daha yüksektir). Keşfedilmemiş nesnelerin boyutları bireysel kaya öbekleriyle toz parçacıkları arasında değişir. Yine de, asteroit kuşağı temelde boş uzaydır ve birbirleriyle itişen kayalarla dolu olarak düşünülmemelidir. Asteroit kuşağına yollanmış uzay araştırma araçlarının hiçbiri hasar görmemiştir, hatta yakınlarından geçerken onları incelemelerine yetecek kadar asteroitlere yaklaşabilmeleri için dikkatle yönlendirilmeleri gerekir.

Jüpiter'in kütleçekiminin ana kuşak asteroit yörüngeleri üzerinde önemli düzeyde etkisi bulunmaktadır. Özellikle de asteroitlerin süreleri kendisininkiyle rezonans içinde olacak yörüngelere yerleşmelerinin önüne geçer. Yörünge süreleri Jüpiter'le basit 4:1, 3:1, 5:2 ya da 2:1 oranlarında olan hiçbir asteroit bulunmamaktadır. Bu oranlar Güneş'ten sırasıyla 2,06, 2,50, 2,82, 3,28 AB ortalama uzaklıklarına (yörüngesel yarı-büyük eksenler), yani 1886'da bunları keşfedip açıklamış olan Daniel Kirkwood'a göndermeyle Kirkwood boşluklarına tekabül eder. Tüm yörünge rezonanslarının asteroit yörüngelerine göre istikrarsız oldukları söylenemez; aslına bakılırsa, yörünge süreleri Jüpiter'inkinin üçte ikisi olan küçük bir asteroit ailesi vardır (3:2 yörünge rezonansı).

Jüpiter'le *aynı* yörünge süresine sahip daha birçok asteroit bulunmaktadır. Aralarından boyutu 1 kilometrenin

üzerinde olanların sayısı bir milyondan fazla olabilir ve toplam kütleleri ana kuşağın yaklaşık beşte birini oluşturur. Bunlar, Jüpiter'in yörüngesinde, 60° önünde ya da 60° arkasındaki yerlerde görülürler. Güneş'le Jüpiter'in birleşik kütleçekimi gücünün küçük nesnelerin istikrarlı bir biçimde yörüngede kalmalarına izin verdiği, yol gösteren ve izleyen Langrage noktaları olarak bilinen özel yerlerdir bunlar. Bu yörüngelerdeki asteroitlere Troya Savaşı'nın kahramanlarının adları verilir (Yunan adları Jüpiter'in 60° önünde, Troya adları 60° gerisindekiler için), toplu olaraksa "Troya asteroitleri" olarak adlandırılırlar.

Sonumuz belli!

Mars'la benzer bir "Troya" ilişkisinde birkaç asteroit bilinmektedir, ama Dünya'nın Troyalı bir yoldaşı yoktur. Ancak, yörüngeleri bizim yörüngemizle çakışan ve Dünya'yla kesişen asteroitler olarak bilinen bazı asteroitler vardır. Çarpışmadan kaygılanıyorsanız, korkutucu gelebilir bu size, ama asteroit yörüngeleri genellikle eliptiğe eğilimlidir ve, bu nedenle, yörüngemizden geçtiklerinde neredeyse her zaman "üstümüzden" ya da "altımızdan" geçerler. Dünya'yla kesişenlerin yalnızca bir altkümesi Tehlikeli Olabilecek Asteroitler (TOA'lar) olarak görülür; Dünya'dan 0,05 AB uzaklıktan (çeşitli üçüncü gökcisimlerinin neden olduğu sapmaların bir çarpışmaya yol açabileceği yakınlıktan) geçen ve çapı 150 metrenin üzerinde (atmosfer geçişini hızları azalmadan atlatabilecek büyüklükte) olan asteroitlerdir bunlar. 2009 sonuna gelindiğin-

de yaklaşık 1.100 TOA ve, ayrıca, 100'den az Tehlikeli Olabilecek Kuyrukluyıldız belgelenmişti.

Hesaplamalara göre, günümüze en yakın tarihte yaklaşacak olan TOA, 13 Nisan 2029 Cuma günü bize çok yaklaşacak olan (350 metre uzunluğundaki) Apophis'tir. 2004'te keşfedilmesinden kısa bir süre sonra, yörüngesi yeterince bilinmediğinden, (% 2,7 olarak tahmin edilen) bir çarpışma olasılığı vardı, ama sonradan uzun bir gözlemler dizisi yüzeyin yaklaşık 30.000 kilometre yukarısından emniyetle geçeceğini gösterdi. 13 Nisan 2036'da geri gelecek ve, 2029'da *tam olarak* ne kadar yakınımızdan geçeceğini bilmediğimizden, bu karşılaşma sırasında izleyeceği yolun Dünya'nın kütleçekiminden tam olarak ne kadar etkileneceğini bilmiyoruz. Ancak, 2036'da çarpışma olasılığı yok denecek kadar az.

Hızı düşmeden Dünya atmosferine girebilen bir asteroit çok tehlikelidir. Okyanusa çarptığında tsunamiye yol açabilir ve karaya düşerse de kendisinden çok daha büyük bir krater oluşturarak çevre alanı harap eder. Pasifik Okyanusu'nun güney ucunda, Bellinghausen Denizi'nin tabanının altında, 2,2 milyon yaşında, 130 kilometrelik, görünüşe bakılırsa kilometrelerce çapta bir asteroidin yarattığı, Eltanin adında bir krater keşfedildi. Deniz yatağına çarpmasından önce, bırakın atmosferi, okyanus bile böyle bir asteroidi yavaşlatamayacaktır. Bilgisayar modellerine göre, sonuçta oluşan tsunami kıyıları güney Şili'de deniz yüzeyinin 300 metre, Yeni Zelanda'daysa 60 metre üzerine dek harap edecektir. Atmosfere fışkıran su ve toz miktarı, yaklaşık olarak bu tarihlerdeki, atamız *Homo erectus*'un Afrika dışına göç etmesine yol açmış olan iklim değişimi-

nin tetikleyicisi bile olabilir. Dünya'yla 10 kilometrelik bir "dinozor katili" asteroit arasındaki son çarpışma 65 milyon yıl önce gerçekleşti ve şu anda Meksika'daki Yucatan Yarımadası'nda tortu altında gömülü olan 200 kilometre çapındaki Chicxulub kraterini yarattı. Bu da Dünya'daki canlı türlerinin yaklaşık % 75'inin yeryüzünden silindiği "kitlesel soy tükenmesi olayı"nın nedeni olarak kabul edilen, küresel çapta bir çevre felaketine neden oldu.

Bu boyuttaki felaketler neyse ki enderdir, ama istatistikler, asteroit çarpmalarının olası ölüm nedenleri arasında volkan püskürmeleri, depremler ve aşırı düzeydeki hava şartlarıyla birlikte yer aldığını gösteriyor. Çarpma noktasından 3.000 kilometre uzaklıktaki kıyıları harap edebilen 1 kilometrelik bir asteroit okyanusa ortalama olarak her 200.000 yılda bir çarpar, tsunami tehlikesi yarıçapı önemli düzeyde küçük 200 metrelik bir asteroidiyse her 10.000 yılda bir bekleyebiliriz.

Gökbilimciler her bir TOA'in oluşturduğu tehdidi, (Torino'daki bir toplantıda kararlaştırılan ve dolayısıyla adını buradan alan) Torino Ölçeği adında bir sayısal sistem kullanarak sınıflandırırlar. Bu ölçekte, aktarılacak enerjiyle çarpışma olasılığı 0'la 10 arasında tek bir sayıda birleştirilir; 0, ihmal edilebilir çarpışma olasılığı ve/veya atmosfere giremeyecek kadar küçük anlamına gelirken, 10, küresel felakete yol açacak bir "dinozor katili"nin kesin olarak çarpması demektir. Çapları 150 metrenin üzerindeki TOA'ların çoğu keşfedildiklerinde ya 0 ya da 1 olarak sınıflandırılırlar ve yörüngeleri daha doğru bir biçimde saptandığında 1'ler genellikle 0'a indirilir. Apophis geçici olarak 4 ("gökbilimcilerin dikkatini gerektiren yakın kar-

şılaşma; bölgesel yıkıma yol açabilecek çarpışma olasılığı ›%1 ya da üstü) gibi yüksek bir Torino sınıfına sokulmasıyla bu rekoru elinde tutmaktadır, ama 2006'da riski 0'a indirilmiştir.

Spaceguard olarak bilinen yarı resmi bir gözlemevi ağı, tüm TOA'ların yerlerini belirleyip sınıflandırma görevini üstlendi. Etkilerini hafifletmekten başka bir şey yapamayacağımız çoğu doğal afetin aksine, bir TOA çarpışmasının önüne geçmek mümkün olacağından, önemli bir girişim bu. Çarpışmanın önlenmesi için TOA'nın ya hızının ya da ilerleme yönünün değiştirilmesi gerekir. Bu ne kadar önceden yapılırsa, gereken değişiklik o kadar azalacaktır. TOA'nın roket motoruyla donatıldığı kaba güç yöntemiyle işi sizin yerinize güneşin radyasyon baskısının yapması için bir tarafının yansıtıcı bir maddeyle kaplanması gibi daha incelikli planlar arasında değişen birçok yol bulunmaktadır. Yaklaşmakta olan bir TOA'yı nükleer bombayla patlatmak pek akıllıca bir fikir değildir, çünkü parçaların hepsinin atmosfere sızamayacak kadar küçük olmalarını garanti altına alamazsanız, çok sayıda çarpmaya yol açarak sorunu daha da ağırlaştırabilirsiniz.

Asteroit madenciliği

Asteroitlerin değerli hammadde kaynakları olabilecekleri düşünüldüğünde, işin hayırlı bir yönü de var. 1 kilometrelik M tipi bir asteroit dünyanın yıllık tüketiminden daha fazla nikel ve demir içerir ve kütlesi en yüksek örnek olan Psyche'de bunlardan milyonlarca yıl yetecek kadar

vardır. Asteroitler, özellikle de M tipi olanlar platin gibi değerli metaller de içerirler.

İlk asteroitte madenciliğe başlamak için gereken yatırım çok yüksek olacaktır, ama olası getiri de muazzam düzeydedir. Asteroitlerin başlıca değerinin Dünya için mi yoksa uzay sanayileri için mi hammadde kaynağı olmaya dayanacağını henüz bilemiyoruz. Dünya'ya yakın cisimlerin bazıları, muhtemelen, tozlu yüzeylerinin altında artakalmış su-buzunun bulunduğu ölü kuyrukluyıldızlardır ve bu su içme suyu kadar, itici madde ya da radyasyon kalkanı olarak da değer taşıyabilir.

Adlar ve geçici tanımlamalar

1891'e gelindiğinde 332 asteroit görsel olarak keşfedilmişti, ama fotoğraf 10 yıl içinde çeteleyi 464'e yükseltecekti. Şu anda bilinen her türden 100.000'in üzerinde cisim var ve her birinin bir şekilde tanımlanması gerekiyor. Her yeni keşfe verilen geçici tanımlama sistemini IAU denetliyor. Sistemde keşif yılı ve, buna ek olarak, keşfin tarih ve sırasına tekabül eden iki harfli bir şifre ve altsayılar bulunuyor. İlk harf (A-Y, I hariç) keşfin hangi yarı-ayda yapıldığına (1-15 Ocak için A, 16-31 Ocak için B diye devam ederek, 16-31 Aralık için Y'ye kadar), ikinci harf (AZ, I atılıyor ve böylece İngilizce alfabeden 25 seçenek kalıyor) her keşfin sırasına göre veriliyor ve altsayılar da 25 döngüsünün gerektiği kadar çok kere kullanılmasını sağlıyor. Böylece, 2011 BA, 16-31 Ocak 2011 döneminde keşfedilmiş ilk gökcismi, 2011 BB ikincisi, 2011 BA_1

26. oluyor. Bir cismin yörüngesi yeterince saptandığında (ki bu yıllar alabiliyor), geçici tanımlamanın yerini alacak kalıcı bir ad verilebiliyor. Örneğin, Apophis'in ilk baştaki geçici tanımlaması (16-30 Haziran 2004 döneminde yapılan 113. keşif anlamında) 2004 MN_4'tü.

Kalıcı bir ad önerme ayrıcalığı keşif ekibine tanınıyor, ancak bazı otomatik araştırmalar o kadar çok yeni cismi ortaya çıkarıyor ki, yöneticiler önerileri memnuniyetle karşılıyorlar. Kalıcı adlar bir addan ve ondan önce gelen, her yeni ad eklendiğinde sırayla eklenen bir sayıdan oluşuyor. Böylece, resmi olarak elimizde (1) Ceres, (4) Vesta, (99942) Apophis vb. oluyor. Bütün bu cisimler için yeterince mitolojik ad yok ve adların hakaret içermemesi ve yakın tarihli siyasi ya da askeri faaliyetlerle ilişkisiz olması dışında neredeyse her şeye izin veriliyor. Adları asteroitlere verilmiş birçok gökbilimci tanıyorum (meslektaşları tarafından; bir asteroide siz kendi adınızı veremiyorsunuz) ve Navaho dilinde "uçan kaya" anlamındaki (5460) Tsenaat'a'i adında bir asteroit var. Adlandırılmasında payım olan tek asteroit, BBC televizyonunun Latincesi *Caelum Noctu* olan *The Night Sky* adlı uzun süreli programının 2007'deki 50. yıldönümünü anma amaçlı (57424) Caelum Noctu'dur. Uzun bir listeden, 24 Nisan 1957 (57/4/24) olan ilk yayın tarihini yansıttığı için seçtik bu adı.

VI. Bölüm

NEPTÜN ÖTESİ CİSİMLER

Jüpiter'le Neptün arasında, Kentauroslar olarak bilinen, görece dağınık bir asteroit grubu yer alır. Bazıları koyu renkli ve kırmızıdır, katransı (tolin kaplı) D tipi asteroitlere benzerler; bazılarıysa daha mavidir ve bu da yüzeylerinin büyük bölümünün yeni açığa çıkmış buzdan oluşabileceğini düşündürmektedir. Yörüngeleri dev gezegenlerle kesiştiği ya da onlara yaklaştığı için, istikrarlı değildirler; varlıklarını yaklaşık 10 milyon yıldan fazla sürdüremezler. Kentauroslar, belki de Neptün'le yakın temas sonucunda, içeriye doğru dağılmış NÖC'ler olabilirler. Dev gezegenlerle başka etkileşimler de onları içeri doğru iter ve sonunda kısa yörünge süreli kuyrukluyıldızlara dönüşür, enberilerini Güneş tarafından ısıtıldıkları ve uçucu maddelerini kimi zaman muhteşem görünebilen kuyruklarda kaybettikleri iç Güneş Sistemi'nde geçirirler.

Neptün'ün yol gösteren Langrange noktası yakınlarında altı Troya cismi keşfedilmiştir. Dinamik savları (her iki Langrange noktasında) daha çok sayıda cismin keşfedil-

meyi beklediğini ve Neptün'ün Troyalıları sayısının Jüpiter'inkilerin on katı olabileceğini düşündürmektedir.

Neptün'ü geçtiğimizde Kuiper kuşağına ve tüm öteki NÖC'lere ulaşırız. Kuiper kuşağı cisimleri ailelerinden biri, Neptün'le 3:2 yörünge rezonansıyla hareket eder. Bu sınıfın Plüton'u da içeren üyeleri gayri resmi olarak "plütinolar" olarak bilinmektedir; bu terim, cüce bir gezegen olarak sınıflandırılabilecek büyüklükte herhangi bir NÖC için kullanılan resmi IAU terimi olan Plütoid'le karıştırılmamalıdır. Plütoidler plütino, (Neptün'le yörünge rezonansları sergilemeyen) klasik Kuiper kuşağı cisimleri ya da ana kuşağın ötesindeki Dağınık Disk cisimleri olabilirler. Plüton'dan sonra keşfedilen ilk Kuiper kuşağı cismi 1992 QB1 geçici tanımlamasını taşıdığı için, klasik Kuiper kuşağı nesneleri bu tanımlamanın İngilizcedeki okunuşundan ötürü "cubewano"lar (QB1-os) olarak da bilinir.

Plüton ve Charon

NÖC'lerin çoğunun özellikleri fazla bilinmez. Ancak, Plüton'la uydusu Charon, yeterince büyük ve yakın olmaları sayesinde, onlarca yıldır teleskopla incelenebilmişlerdir. Spektroskopi yoluyla Plüton'da donmuş nitrojen, metan ve karbondioksit saptanmıştır ve en keskin teleskop görüntüleri muhtemelen tolin zengini kalıntılar olabilecek karanlık kesitleri gözler önüne serer. Plüton'un yoğunluğu, toplam kütlesinin yaklaşık % 70'inin kaya olması gerektiğine işaret eder ve büyük olasılıkla kayalık bir çekirdeği (ayrıca, muhtemelen, demir zengini bir iç çekirdeği), onun

üzerinde çoğunlukla su buzundan oluşan bir mantosu ve en tepede de uçucu maddelerin daha bol olduğu bir kabuk bulunmaktadır.

Enberi yakınlarında (en son 1989'da gerçekleşmiştir) Plüton'un muhtemelen Triton'unkinden daha yoğun bir nitrojen zengini atmosferi vardır. Plüton'un kütleçekimi çok zayıf olduğundan, atmosferinin % 99'unu kapsayan hayali bir kaplama, yüzeyin 300 kilometre yukarısına dek uzanacaktır; Dünya'daysa buna eşdeğer yükseklik yalnızca 40 kilometredir. Güneş'ten uzaklık enberide 4,5 milyar kilometreden 2113'te enötede 7,4 milyar kilometreye yükselirken, Plüton'un atmosferinin büyük bölümünün yüzeyde yoğuşması beklenmektedir. Enberi sırasında Plüton'u yakın mesafeden inceleme şansını kaçırmış olmamız büyük bir kayıp. NASA'nın *New Horizon* uçuşu Plüton'un yanından 2015'te geçecek ve bu döneme gelindiğinde atmosferin büyük bölümü yoğuşup "kalıcı" yüzeyi mevsimsel bir nitrojen buzu kılıfı altına saklamış olabilir.

Plüton'un 6,4 günlük dönüş süresi, yine senkronize olarak dönen en büyük uydusu Charon'un yörünge süresiyle aynıdır. Bu ilişki güçlü gelgitlerin sonucudur ve Plüton'la Charon'un sürekli olarak aynı yüzlerinin birbirlerine dönük olmasına yol açar. Plüton'un Charon'la boyut ve kütle açısından orantıları, başka herhangi bir gezegen ya da cüce gezegenin kendi en büyük uydusuyla orantılarına göre daha eşittir. Charon'un kütlesi Plüton'un kütlesinin yaklaşık % 12'si kadar ve yörüngesi Plüton'un merkezinden yalnızca 17 Plüton yarıçapı uzaklıktadır. Karşılaştırma için, Ay'ın kütlesi Dünya kütlesinin yalnızca % 1,2'si kadar ve yörünge yarıçapı 60 Dünya yarıçapıdır. Charon'un

1978'e kadar saptanamamasının nedeni, Plüton'a yakınlığıdır. Plüton'un Nix ve Hydra adlı daha küçük iki uydusuysa 2005'te keşfedilmiştir. Bunların yörüngeleri, Plüton'un yörünge düzleminde, Charon'la yaklaşık 4:1 ve 6:1 rezonanslardadır.

Plüton yüzeyinden bakıldığında, Charon, Ay'ın Dünya'dan görünüşüne kıyasla sekiz kat daha geniş görünecektir. Göreceli kütleleri bu kadar benzer olduğundan, ortak kütle merkezleri (ağırlık merkezleri) Plüton'un içinde değil, uzayda iki gökcismi arasındaki bir noktadadır. (90) Antiope gibi ikili asteroitler ve 2001 QW_{322} gibi ikili Kuiper kuşağı cisimleri bilinse de, Plüton-Charon, gezegen ya da cüce gezegen sayılabilecek büyüklükteki gökcisimleri arasında en orantılı çifttir.

Charon yüzeyine amonyum izleri taşıyan su-buzu hâkimdir. Yoğunluğu Plüton'dan düşük, ama yine de önemli düzeyde bir kayalık çekirdeğe yetecek düzeydedir. Charon'un görece pasif, bol kraterli bir küre olduğu ortaya çıkabilir; Plüton ise, yüzey malzemelerinin çeşitliliğinin işaret ettiği üzere, jeolojik açıdan aktif olmasıyla hepimizi etkileyebilir.

Öteki taraftan, Charon'un büyük kuzeninden daha aktif olmasının bir nedeni olabilir. Bu neden, Plüton'un eksen eğikliğinin 119,6^0 olmasıdır (90^0'nin üstünde olduğundan, ters dönüşlüdür). Charon'un yörüngesi tam olarak Plüton'un ekvator düzleminde ve bu nedenle de Güneş'in etrafındaki ortak yörüngelerine görece yüksek eğikliktedirler. Güneş'in ve Plüton'un Charon üzerinde birbirleriyle rekabet eden gelgit çekimlerinin, Charon'un buzlu mantosunun içinde bir yerlerde erimeye yol açacak

kadar güçlü olması mümkündür. Durum böyleyse, Charon için Europa benzeri bir yüzey ve hatta, altında, yaşam barındırma potansiyeline sahip bir okyanus gibi ilgi çekici bir olasılıkla karşı karşıyayız demektir. Şu ana dek ulaşabildiğimiz en iyi ipucu, Charon'un 2007'de elde edilmiş kızılötesi spektrumlarıdır; bunlarda, on binlerce yılı aşkın bir süre boyunca güneşin ultraviyole ışınımına ve kozmik ışın bombardımanına maruz kalmış amorf, submikroskobik durumdaki buzla tezat oluşturan, hâlâ bozulmamış kristalli durumda su-buzu bulunmuştur. Bunun için en basit açıklama, Enceladus'taki sorguçlar gibi, içeriden dışarıya taze buz fışkırtan gayzerlerdir.

Geri kalanlar

Tablo 7'de Plüton ve öteki en büyük on NÖC, bu satırların yazıldığı dönemdeki sıralamayla verilmiştir. Bunların arasından Eris, Makemake ve Haumea resmi olarak cüce gezegen kabul edilir. Haumea ya hızlı dönüşü (4 saatin altında) ya da bir çarpışma nedeniyle basıktır. Eris ve 2007 OR_{10} (Dağınık Disk cisimleri), 2002 TC_{302} (Neptün'le 5:2 yörünge rezonansı), Ixion (plütino) ve Dağınık Disk'in çok ötesindeki tuhaf bir örnek olan, son derece eliptik yörüngeli ve enötesi 975 AU'da bulunan Sedna dışındakilerin hepsi klasik Kuiper kuşağı cisimleridir.

Plüton hariç, bu cisimlerin boyutları yeterince bilinmemektedir (tabloda tek bir yuvarlak rakam verilmiş olanların bile). Boyutları, albedoları (yansıttıkları güneş ışığı yüzdesi) hakkındaki varsayımlara dayalı tahminlerdir.

Tablo 7. En büyük Neptün ötesi cisimler.

Ad	**Çap /km**	**Güneş'ten ortalama uzaklık/AB**	**Yörünge süresi /yıl**	**Bilinen uyduları**
Eris	2.400	67,7	557	Dysnomia (250 km)
Plüton	2.306	39,4	248,0	Charon (1.205 km)
				Nyx (140 km)
				Hydra (170 km)
Makemake	1.300-1.900	45,8	309,9	-
Haumea	1.400	43,1	283,2	Hi'iaka (310 km)
				Namaka (170 km)
Sedna	1.400	525,9	12.059	-
2007 OR_{10}	900-1.400	67,3	552,5	-
2002 TC_{302}	850-1.450	55,2	410,6	-
Quaoar	1.000	43,6	288,0	Weywot (100km)
Orcus	950	39,2	245,3	Vanth (250 km)
Varuna	500-1.000	43,1	283,2	-
Ixion	650-820	39,7	248,9	-

Yansıtma oranları varsayılandan düşükse, daha büyük olmalıdırlar, ama, varsayılandan yüksekse, o zaman da daha küçük olacaklardır. Yüzeylerinden gelen ısıl ışınım ölçülerek boyut tahminleri iyileştirilebilir, ama çok soğuk olduklarından (-230 °C ya da altı) bu ancak Dünya atmosferinin üzerinden, yani uzaydan, teleskopla yapılabilir. Belirsizlikler düşünüldüğünde, gelecekteki "ilk on" listelerine bu cisimlerin hepsinin girebilmeleri olası görünmemektedir.

NÖC'lerin renkleri kırmızıyla (muhtemelen yüzeylerinde yaygın tolinler) mavi-gri (açıkta buz ya da amorf karbon) arasında değişir. Haumea mavi-gri olanlardan biridir ve (uydularının yörüngelerinden bulunan) kütlesi, yoğunluğunun Plüton'dan yüksek olduğunu gösterir, yani buz dışı içeriği görece yüksek olmalıdır. Quaoar'da spektroskopiyle saptanmış olan kristal buz ve amonyum hidrat, (Charon için öne sürülenlerle benzer savlar kullanıldığında) yakın tarihli yeniden yüzeye çıkmaya işaret eder. Bu da ya jeolojik faaliyet ya da büyük bir çarpma olayı sonucunda, tayfa egemen olmaya yetecek kadar yayılacak püskürtü üretilmesini gerektirir.

NÖC'lerin % 2-3'ünün uydularının olduğu bilinmektedir; uydulu asteroit miktarına benzer bir orandır bu. Daha büyük NÖC'lerde oranın daha yüksek olması, kökenlerinin açıklanması çabasında sorun yaratır.

NASA'nın *New Horizon* aracı, 2015'teki Plüton-Charon yakın uçuşundan sonra sağlam kalırsa, daha uzak bir NÖC'ye yöneltilecek. Hedef henüz belirlenmedi, ama ideali, Plüton'un kızıllığıyla tezat oluşturacak mavi-gri bir cisim olacaktır.

Bir Neptün ötesi gezegen mi?

Gökbilimcilerin çoğu, Güneş Sistemimize ait büyük nesnelerin hepsini keşfetmiş olduğumuzu kabul ederler. Kuiper kuşağında gezegen boyutlarında bir cisim saklanıyor olamaz. Böyle bir cisim mevcut olsaydı, Kuiper kuşağı istikrarsızlaşırdı. Ancak, ("Gezegen X" denen) uzaklarda-

ki bir gezegen için henüz ortadan kalkmamış iki olasılık vardır. Bunlardan biri, Güneş'ten 80'le 170 AB arası uzaklıkta, eğimli ve dış merkez yörüngeli, Dünya kütlesinde bir cisim bulunduğudur. Bu kadar büyük (ve belki de ilk başta Neptün'le yakından karşılaşması sonucunda dışarıya doğru fırlamış) bir cismin varlığı, Kuiper kuşağında 48 AB ötesinde görülen ve "Kuiper uçurumu" olarak bilinen ani sayı düşüşünü açıklayabilir. Sedna gibi cisimlerin kanıt oluşturduğu, aşırı düzeydeki dağınıklığın da nedeni olabilir.

İkinci olasılık, uzun yörünge süreli kuyrukluyıldızların rasgele yönlerden gelmekten çok, gökyüzündeki belli bir bölge kökenli olmalarından doğar. Bu kuyrukluyıldızların Güneş'ten yaklaşık 32.000 AB uzaklıkta, Jüpiter kütlesinde bir gökcismi tarafından Oort Bulutu'ndan kopartıldıkları öne sürülmüştür. Bunun teleskopla saptanması zor olacaktır, ama olanaksız değildir. Bu kadar uzaktaki bir "gezegen"in kütleçekimiyle Güneş'e bağlı olması gerekmez; yıldızlararası uzaydaki, belki de başka bir yıldızın gezegen sisteminden kaçmış başıboş bir gezgin de olabilir.

VII. Bölüm

DIŞ GEZEGENLER

Öteki yıldızlann etrafında da gezegenler bulunduğundan artık hiçbir kuşku yok. Görece yakın zamanlara dek bu bir spekülasyon konusuydu, ama, 2010'a gelindiğinde, etrafında en az bir gezegenin döndüğü kanıtlanmış yıldız sayısı 400'ü aşmıştı. Saptanmalannın ne kadar güç olduğunu dikkate alırsak, Güneş'e benzeyen yıldızların çoğuna gezegenlerin eşlik etmesi gerektiği açıktır. Kafa karışıklığı yaratmamak için profesyoneller bunlara genellikle "güneş dışı gezegenler" ya da "dış gezegenler" derler. Dış gezegen çetelesinde, deteryumun (ağır hidrojen) nükleer füzyonunun gerçekleşebileceği eşiğin yukarısı olan 13 Jüpiter kütlesini aşan egzotik, donuk nesnelere yer verilmez. Bunlara "kahverengi cüceler" denir ve gezegen benzeri olmaktan çok, yıldız benzeri sayılırlar.

Saptama yöntemleri

Genç Güneş-benzeri yıldızların çoğunun etrafında bir toz halkası bulunduğu yönündeki kanıtlar 1970'lerin son-

larında birikmeye başlamıştır. İlk ipuçları, tozun bir aday yıldızın kızılötesi tayfındaki etkisinden geldi ve ardından, 1980'lerde toz disklerinin görüntüleri elde edilmeye başladı. Bu disklerin gezegenlerin oluşmasından önceki güneş nebulasına mı benzediklerine, yoksa bir yıldızın Kuiper kuşağının eşdeğerinde artakalmış toz mu olduklarına bağlı olmaksızın, yalnızca varlıkları, oralarda bir yerlerde çok sayıda gezegen olması gerektiğini gösterdi. İlk kesin dış gezegen keşfi 1995'te yapıldı ve bundan sonra keşifler her yıl artarak devam etti.

Radyal hız

İlk keşif ve sonraki keşiflerin çoğu (2010'a gelindiğinde 300'den fazla), bir yıldızın radyal hızındaki küçük değişimlerin saptanmasıyla yapıldı. Radyal hız, görüş hattı boyunca herhangi bir hareketten bağımsız olarak, bir yıldızın Dünya'ya ya da ondan uzağa doğru yol aldığı hızdır. Yıldızın tayfında karakteristik soğurma hatlarının ortaya çıktığı tam dalga boyundaki değişimler ölçülerek, radyal hız değişimleri saniyede bir metre gibi fevkalade bir hassasiyetle saptanabilir. Doppler etkisi denen bir olguyla, yıldız bize doğru hareket ediyorsa daha kısa dalga boylarına ("maviye kayma"), uzağa doğru hareket ediyorsa da daha uzun dalga boylarına ("kırmızıya kayma") geçerler. Radyal hızdaki değişimler uzun zaman ikili yıldızların yörünge hızlarının ölçümünde (ve dolayısıyla kütlelerinin çıkarsanmasında) kullanılmıştır, ama kütlesi düşük bir dış gezegenin kütlesi görece çok daha yüksek bir yıldız üzerindeki etkisinin kü-

çüklüğü, çok hassas modern donanımların kullanılmasını gerektirir. Bir dış gezegenin yıldızı üzerindeki çekimine atfedilebilen daha küçük değişimlerin anlaşılmasından önce, Dünya'nın kendi yörüngesel hareketinin neden olduğu radyal hız değişimleri hesaba katılmalıdır.

Yıldızla dış gezegen arasındaki kütleçekimi, kütlelerinin toplamına bağlıdır. Neyse ki, Güneş'e benzer yıldızlarda, yıldız tayf tipiyle kütle arasında gayet iyi bilinen bir ilişki bulunuyor. Bunu bildiğimizden, yıldızın ileri ve geri hareketinden sorumlu dış gezegen kütlesinin saptanmasında radyal hız değişimleri büyüklüğünü ve periyodunu kullanabiliyoruz. Genellikle, bir dış gezegenin yörünge düzleminin yöneliminin bağımsız bir ölçütü yoktur ve, yörünge düzlemi bizim görüş hattımızla tam olarak düz çizgide olmadıkça, hızdaki gerçek değişim bizim saptadığımızdan fazla olmalıdır. Ancak, (rasgele yönelimli yörünge düzlemleri varsayımına dayalı) istatistiksel savlar, kütlelerin çoğunun, yörüngenin bize dik çizgide olduğu varsayımına dayalı tahminin iki katından fazla olamayacağını göstermektedir.

Yıldızın radyal hızında en büyük değişimlere hem kütle büyüklüğü hem de yakınlık yol açtığından, radyal hız yöntemi, en çok, yörüngeleri yıldızlarına yakın olan büyük gezegenlerde işe yaramaktadır. Bu nedenle, saptanan ilk dış gezegenlerin genellikle kütleleri Jüpiter'den büyük, ama yörüngeleri yıldızlarından yalnızca bir AB'nin küçük bir bölümü kadar uzaklıktakiler olması kimseyi şaşırtmamalı.

"Sıcak Jüpiter" denen bu dış gezegenlerin keşfi, yıldızlarının buz hattının çok içinde kalmaları ve şu anda onları

gördüğümüz yerlerde oluşmalarının mümkün olmaması nedeniyle, büyük heyecan yarattı. Artık, daha dışarılarda geliştikleri ve ardından içerilere doğru göç ettikleri kabul ediliyor ve bu da kendi Güneş Sistemimizin erken tarihindeki gezegen göçünün boyutuna ilişkin tartışmayı yeniden gündeme getirdi. Jüpiter'in göçü içeri doğru devam etmiş olsaydı, her yerbenzeri gezegeni sırayla yok eder ya da dağıtırdı. "Sıcak Jüpiterler", bir süreliğine, böyle bir sonucun normal ve bizimki gibi gezegen sistemlerinin son derece ender olması düşüncesini gündeme getirdi. Ancak, gelişmiş ve yeni dış gezegen saptama teknikleriyle kayalık gezegenler bulunmaya başladı ve bu da ilk keşiflerdeki "sıcak Jüpiterler" bolluğunun yalnızca keşfedilmelerinin kolaylığından kaynaklanan bir seçilim etkisinden ibaret olduğunu gösterdi.

Transitler

Yakında radyal hız yöntemini gölgede bırakması olası görünen ikinci en verimli dış gezegen keşfetme yöntemi, bir dış gezegenin önünden geçişi sırasında yıldızın ışığının küçük bir bölümünün kesildiği "transit"leri aramaktır. Transitlerin çoğu, olası yıldızların otomatik teleskoplar kullanılarak ilk başlarda yerden, ama artık bu işe ayrılmış teleskoplarla da uzaydan, tekrar tekrar taranmasıyla keşfedilmiştir.

Bir transit ancak dış gezegenin yörünge düzlemi neredeyse tam olarak bizim görüş hattımızda yer aldığında gerçekleşebilir ve bu da istatistiksel olarak tüm dış geze-

gen sistemlerinin yalnızca yaklaşık yüzde yarımı için geçerli olmalıdır. Yıldızın ışığındaki sönükleşme çok azdır, ama en yüksek düzeye büyük dış gezegenlerde ortaya çıkar ve yörüngesi yıldızlarına yakın dış gezegenlerde daha sık görülür (ve, dolayısıyla, saptanma olasılığı daha yüksektir). Bir kez daha, "sıcak Jüpiterler"in keşfedilmesi, tüm öteki türlerdeki gezegenlere kıyasla daha olasıdır. Yıldız ışığındaki sönükleşmenin tam miktarı, gezegenin yıldızına oranla boyutunun çıkarsanmasında kullanılabilir. Transitin süresi yörünge hızı ve yarıçapı konusunda ipuçları verir, ama izleyen radyal hız ölçümleriyle sistemin özellikleri daha iyi anlaşılabilir. Transit, yörünge düzleminin bizim görüş alanımızın içinde olduğunu gösterdiğinden, radyal hız yöntemiyle ulaşılan kütleler asgari tahminlerden çok, gerçek değerlerdir.

Görüntüleme ve öteki yöntemler

Yıldızlarından çok daha donuk olduklarından, dış gezegenlerin görüntülenmesi aşırı derecede zordur. Yalnızca bir avuç yıldızda tekil dış gezegen görüntülenebilmiştir. Bekleneceği üzere, bunların hepsi Jüpiter boyutlarında ya da daha büyüktür ve çoğunun yörüngeleri onlarca, hatta yüzlerce AB'dedir. 2008'de Hawaii'deki kızılötesi teleskoplardan elde edilen bir uyarlanmalı optik görüntüsü, Güneş'e benzer (HR 8799 olarak kataloglanmış) genç bir yıldızın etrafında 24, 38 ve 68 AB'de dönen üç dış gezegeni gösterdi. Arkalarında, yaklaşık 75 AB'de bir toz diski de bulunmaktadır.

"Astrometri" adı verilen bir diğer dış gezegen saptama yöntemi gelecek için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu yöntem, yıldızın gökyüzündeki konumunun çok kesin ölçümüne dayalıdır. Etrafında dönen ve görülmeyen herhangi bir nesne, yıldızı bir taraftan ötekine çekecektir. Astrometri, görüş hattı boyundaki radyal hız değişimleri yerine, bunu saptamayı amaçlar. Hareketin nedeni geniş yörüngeli devasa bir gezegense, hareket en yüksek değerde olacaktır; bu nedenle, küçük yörüngelere daha duyarlı yöntemlere tamamlayıcı özelliktedir. Astrometri yönteminin doğrulanmış ilk başarısı, 2002'de, Hubble Uzay İstasyonu'nun Gliese 876 olarak kataloglanmış bir yıldızın yana doğru yalpalamasını belgeleyip, daha önceden radyal hız değişimleri sayesinde saptanmış olan, yörüngesi 0,20 AB'deki ve 2,66 Jüpiter kütlesindeki bir gezegen hakkında bildiklerimizi geliştirmesiyle elde edilmiş oldu. Önceden bilinmeyen bir gezegenin astrometri yoluyla ilk keşfiyse 2009'da, VB 10 olarak kataloglanmış bir kırmızı cüce yıldızın 6 Jüpiter kütlesinde bir dış gezegen nedeniyle konumundan saptığının anlaşılmasıyla gerçekleşti.

Tümden farklı bir teknikteyse, ön plandaki bir yıldızla arka plandaki bir yıldız arasındaki rasgele (ve bir daha hiç yinelenmeyen) tam hizalanmadan yararlanılır. Ön plandaki yıldız, arka plandaki yıldızdan gelen ışığı güçlendiren bir "kütleçekimsel mikrolens" işlevi görür. Arka plandaki yıldızın saptanan parlaklığı artar ve sonra, haftalarca devam eden bir süreçte azalır. Rastlantısal olarak ön plandaki yıldızın bir dış gezegeni varsa, kısa (birkaç saat ya da gün süren) bir parlaklık artışına neden olacaktır. 2010'a gelindiğinde mikrolens yöntemiyle toplam on dış gezegen keşfedilmişti.

Dış gezegenlerin adlandırılması

Dış gezegenlere ad verilmez. Yıldızlarının adının ya da katalog tanımlamasının arkasına küçük harfler eklenerek tanımlanırlar. İlk keşfedilen b, ikincisi c'dir ve böyle devam eder (a kullanılmaz). Dolayısıyla, Gliese 876'nın ilk dış gezegeni Gliese 876 b ve aynı sistemde sonradan keşfedilen iki dış gezegen de Gliese 876 c ve Gliese 876 d'dir. Karmakarışık bir düzendir bu ve çoklu sistemlerde harflerle dış gezegenlerin konumları arasında hiçbir ilişki bulunmaz. Ancak, işe yaramaktadır ve adlar dayatmamamız belki de akıllıcadır. Bu gezegenlerin yerlilerinin yuvaları için zaten gayet güzel adları olabilir.

Çoklu dış gezegen sistemleri

50'ye yakın yıldızın etrafında çoklu dış gezegenlerin döndüğü bilinmektedir. Bu bilgiyi bazen saptama yöntemlerinin bileşimiyle elde ederiz, ama radyal hız da tek başına işi görmeye yetebilir: mesele, daha küçük periyodik değişkenlikleri giderek ortaya çıkarmaktan ibarettir. Tablo 8'de daha büyük çoklu sistemlerden bazıları sıralanmıştır. Aralarından Gliese 581 (yaklaşık 20,5 ışık yılı uzaklıktaki bir kırmızı cüce) sistemi özellikle kayda değerdir. Sistem, bilinen kütlesi en düşük dış gezegen olan, belki de yalnızca 1,9 Dünya kütlesindeki (ve neredeyse kesinlikle 4 Dünya kütlesinin altındaki) Gliese 581 e'yi ve, ayrıca, (büyük) bir okyanusla kaplı bir yerbenzeri gezegen olabilecek, 7 Dünya kütlesinden fazla büyüklükteki Gliese 581 d'yi içerir. Gliese 581 e yaşam barındıramayacak, hatta atmosferi ola-

Tablo 8. Bazı çoklu dış gezegen sistemleri. Verilen kütlelerden bazıları asgari tahminlerdir. M_J = Jüpiter-kütlesi.

Yıldız	**Dış Gezegen**	**Kütle/M_J**	**Yörünge yarıçapı /AB**	**Yörünge süresi /gün**
55 Cancri	e	0,024	0,038	2,82
	b	0,82	0,12	14,7
	c	0,17	0,24	44,3
	f	0,14	0,78	260
	d	3,8	5,77	5,218
Gliese 876	d	0,021	0,021	1,94
	c	0,71	0,130	30,1
	b	2,3	0,208	61,1
	e	0,046	0,334	124
Gliese 581	e	0,0061	0,03	3,15
	b	0,049	0,041	5,37
	c	0,017	0,07	12,9
	d	0,022	0,22	66,8
ψ And	b	0,69	0,059	4,62
(upsilon	c	11,6	0,83	237,7
Andromedae)	d	10,3	2,55	1,303
HD 160691	c	0,033	0,091	9,64
	d	0,52	0,92	311
	b	1,7	1,5	643
	e	1,8	5,2	4,206
HR 8779	b	10	24	36,500
	c	10	38	69,000
	b	7	68	170,000

mayacak kadar sıcaktır, ama Gliese 581 d yıldızın yaşanabilir bölgesinde konumlanmış gibi görünmektedir.

Dış gezegeni olduğu bilinen en yakın yıldız, yalnızca 10,5 ışık yılı uzaklıktaki epsilon Eridani'dir. Radyal hız yöntemiyle keşfedilen epsilon Eridani b, 3,4 AB yörüngesinde, Jüpiter kütlesinde bir devdir. Kızılötesi teleskoplar, yıldıza yaklaşık 3 AB ve 20 AB'de merkezlenmiş kayalık enkaz bölgelerinin (asteroit kuşakları) ve, ayrıca, 35-100 AB arasında uzanan bir dış toz diskinin eşlik ettiğini göstermektedir. Toz diskindeki yapı, onda bir Jüpiter kütlesinde ve yaklaşık 40 AB'de, epsilon Eridani c denen teyit edilmemiş bir gezegenin bulunduğuna kanıt olarak gösterilmektedir.

İnceleme

Herhangi bir dış gezegen hakkında doğrudan bilgilerimiz çok az. Kütleyi (radyal hız ya da astrometri yoluyla) saptayabilirsek, olası bir yoğunluk varsayımında bulunarak, boyutunu çıkarsayabiliriz. Transitler boyutu ortaya çıkarabilir, boyut ayrıca görüntülemeyle de çıkarsanabilir (parlaklığa ve varsayılan albedoya dayanarak). Bir yoğunluk varsayımında bulunursak, boyuttan kütleyi çıkarsayabiliriz. Yıldızından uzaklığı yüzey (ya da atmosfer) sıcaklığı konusunda makûl bir fikir verebilir, ama bu aynı zamanda albedoya ve herhangi bir atmosferdeki sera gazları karışımına da bağlıdır, yani hata payı önemli düzeydedir.

Dış gezegenler araştırmasındaki bir sonraki büyük ilerleme, muhtemelen, atmosfer bileşimlerini analiz etme yetimizin gelişmesiyle yaşanacak. Bu, en iyi, bireysel dış

gezegenlerin –en önemlisi yerbenzeri gezegenlerin– görünür ve kızılötesi tayflarını ayırıp analiz edebilen, uzaydaki teleskoplarla yapılır. Bol miktardaki birçok atmosfer gazı türü, karakteristik soğurmaları sayesinde saptanabilir. Oksijen ve metan gibi, basit kimya şartlarında birlikte var olmamaları gereken gaz çiftlerinin saptanması, bir dış gezegenin atmosferini Dünya atmosferinin radikal biçimde değişmiş olmasıyla aynı biçimde etkileyen bir yaşama dair elde ettiğimiz ilk kanıt olabilir.

Dış gezegenlerde yaşam

Galaksimizdeki Güneş'e benzer yıldız sayısı 10.000 milyon civarındadır (toplam yıldız sayısının yaklaşık onda biri). Yeterince incelenmiş Güneş'e benzer yıldızların yaklaşık yarısının etrafında dönen dış gezegenler keşfedilmiş olduğuna göre, sayıları yüksek olmalıdır. Bulunmaları daha kolay olduğundan, şu ana kadar keşfedilenlerin çoğu dev gezegenlerdi ve yerbenzeri gezegenlerin sayısının yüksek olduğu yönünde henüz bir delil bulunmamaktadır. Gezegen sistemlerinin çok çeşitli olduğu açıktır ve şu anda yörüngesi yıldızından 0,06 AB'den az bir uzaklıkta olan ψ And b (Tablo 8) gibi bir "sıcak Jüpiter"in içe doğru göçünde yerbenzeri gezegenlerin ayakta kalabilmiş olmaları mümkün görünmemektedir. Ancak, yerbenzeri gezegenler bulmaya *başladığımız* için, dış gezegen sistemlerinin önemli bir bölümünde bulunmaları olasıdır.

Dış gezegenlerin kaçının yaşamı barındırabileceği zorlu bir sorudur. Çok muhafazakâr bir tahminde bulunup, Gü-

neş benzeri yıldızların ortalama olarak yalnızca % 1'inin uzun süre yaşanabilir bir bölgede dönen bir yerbenzeri gezegeninin bulunduğunu düşünelim. Bu tahmin bizim galaksimizde 100 milyon yaşanabilir yerbenzeri gezegen sonucunu verecektir ve, muhtemelen, dev dış gezegenlerin etrafında dönen en azından bu kadar sayıda yaşanabilir uydu da vardır.

Mantık zincirindeki bir sonraki adım çok daha belirsiz. Yaşam için gerekli şartlar düşünüldüğünde, yaşamın başlaması olasılığı ne düzeydedir? Yaşamın yapı taşları kısıtlayıcı bir etmen değil. Uzayın organik moleküllerle dolu ve suyun da bol olduğunu biliyoruz; öyleyse, yaşanabilir bir bölgedeki dış gezegenlerin çoğunda karbon temelli yaşam için gerekli unsurların hepsi bulunacaktır. Bu da, egzotik kimyalara dayalı öteki yaşam biçimleri hakkında spekülasyonlar peşine düşmeye gerek kalmadan, *Uzay Yolu*'ndaki klişeyle, "bildiğimiz şekliyle yaşam" anlamına gelir.

Yaşamın kendiliğinden ne kadar kolaylıkla ya da zorlukla oluşabileceği meselesi, bu konudaki anlayışımızdaki büyük bir eksikliktir. Ben dahil çoğu kişiye göre, bir dış gezegenin okyanusundaki trilyonlarca uygun organik molekül ve bunların aralarında oyun oynayabilecekleri milyonlarca yıl söz konusu olduğunda, yaşamın başlaması kaçınılmazdır. Yaşam bir kez yayıldıktan sonra tümüyle nasıl silinebileceğini anlamak zor, ama silinse bile, herhalde yine bu kadar kolayca yeniden başlayabilecektir.

Dünya üzerinde yaşamın kalıcı bir biçimde yer edinmesinin 500 milyon yıldan az bir süre aldığını biliyoruz. Dış gezegenlerde yaşam işaretleri saptayana dek, galakside

(ve, dolayısıyla, ötesindeki kozmosta) yaşamın yaygınlığı savı kanıtlanamayacak. Mars, Europa ya da Enceladus'ta günümüzdeki (ya da geçmişteki) yaşamı bulacak olsaydık bile, buralarda yaşamın bağımsız olarak başladığı sonucuna varamazdık, çünkü Güneş Sistemi'ndeki nesneler birbirlerinden tümüyle yalıtılmış değillerdir. Mikroplar çarpma püskürüğü parçacıkları içinde birinden diğerine aktarılmayı atlatabilirler. Europa'daki yaşam Dünya'dan gelmiş olabilir; Dünya'daki yaşamın da Mars'tan gelen bir göktaşıyla buraya ulaşmış olması akla yatkındır.

Orada kimse var mı?

Öteki yıldızların etrafında yaşam varsa bile, peki ya akıllı yaşam var mıdır? Akılcı bir spekülasyonda bulunalım. Şu ana kadar bildiğimiz kadarıyla, biyolojik zekâ, çokhücreli yaşam gerektiriyor. Mikropsal yaşam başlarsa, sonraki evrimlerin çokhücreli organizmalarla sonuçlanması olasılığı nedir? Bu konuda kendi seçiminizi yapabilirsiniz. Bunun Dünya'da gerçekleşmesi birkaç milyar yıl aldı.

Çokhücreli yaşamın ortaya çıkmasından sonra, sağkalım rekabeti Dünya'daki gibi Darwinci evrime yol açacak mıdır? Zekâ avantaj bahşeden etmenlerden biri olduğuna göre, ne derece kaçınılmazdır?

Benim galakside 100 milyon yaşanabilir yerbenzeri gezegen bulunduğu yönündeki muhafazakâr rakamımla bile, yaşamın başlaması olasılığının yalnızca 100'de 1 olduğu yönündeki kötümser görüş buna eklendiğinde, yine de, yaşamın olduğu bir milyon dünyayla karşılaşıyoruz ve bi-

zim Dünya'mız bunlardan yalnızca biri. Bütün bu sayı içerisinde Dünya'nın zekâya ev sahipliği yapan ilk ya da tek gezegen olması tuhaf (ve huşu verici) olurdu. Ama yaşam böylesine yaygın ve zekâ da yaşamın sık görülen bir sonucuysa, herkes nerede? Aşırı derecede ender ortaya çıkması ya da uzun süre devam etmemesi (örneğin, bizim uygarlığımız savaşlara, çeşitli doğal afetlere ya da kendi ürettiğimiz iklim değişimine yenik düşebilirdi) olasılıkları dışarıda bırakıldığında, galaksi zekâ kaynıyor olmalı.

Akıllı yaşam bizim onu bulduğumuz yerin yerlisi olmak zorunda değil. Yıldızlar arasındaki uzaklıklar devasa boyutlarda olsa da, aralarında yolculuk edilmesi gayet mümkün. Işık hızının üzerinde yolculuğa ihtiyacınız yok – yalnızca kararlılık ve sabır yeterli. Yüzlerce kişiyi barındırmaya yetecek büyüklükte, 10 ışık yılı uzaklıktaki bir yıldızın yaşanabilir dış gezegenine ulaşması 100 yıl alacak bir uzay gemisi düşünün. Önümüzdeki birkaç onyıl için öngörülebilen teknolojiyi kullanarak, biz de böyle bir gemi inşa edebiliriz. Mürettebatta bir ya da iki kuşak yoldayken yaşayıp ölür (bir tür yaşam süresini uzatma sistemi kullanılmazsa) ve bu da tek yönlü bir yolculuk olur. Yakınlardaki yaşanabilir dış gezegenlerin tümüne (yüzyıl sonuna gelindiğinde bunları saptayıp özelliklerini belirlemiş olmayı bekliyoruz) böyle koloniciler yollarsak, başarılı kolonilerin kendi koloni gemilerini yola çıkarma kapasitesine ulaşmaları uzun sürmez ve süreç bu şekilde devam eder. Galaksi 100.000 ışık yılı uzunluktadır. Bir kolonileşme dalgasının 10 ışık yılı yayılması 1.000 yıl alsa bile, bütün galaksi yalnızca 10 milyon yıl içinde kolonileştirilebilir. Süreç bir kez başladığında, bütün bir dünyayı silip süpüren felaketler ya da bi-

reysel olarak koloni gemilerinin başarısızlığı, onu rayından çıkarmaya yetmeyecektir.

Galaksinin yaşı 10 *milyar* yılın üzerinde. Zeki yaşam sık rastlanan bir şeyse, önceki sayısız türün galaksiyi kolonileştirmesi için bol bol zaman oldu. Adını Amerikalı fizikçi Enrico Fermi'nin 1950'deki yorumlarından alan Fermi Paradoksu'dur bu. Dünya dışı uygarlıkların sayısı çok yüksek olmalı, ama ortada onlardan hiçbir iz yok: (SETI –Search for Extra-Terresterial Intelligence– bayrağı altında çalışan ekiplerin gökyüzünü taramalarına rağmen) ne uzaydan geldiği saptanmış yapay sinyaller, ne büyük astronomik mühendislik eserlerine dair işaretler, ne de güvenilir biçimde belgelenmiş, Dünya'ya gelmiş uzaylı ziyaretçiler var. Acaba her şeye rağmen akıllı yaşam ender oluşan bir şey mi, yoksa biz kanıtları göremeyecek kadar aptal mıyız? Yanıtı bir gün bulacağımızı umuyorum.

Ek Kaynaklar

Gökbilim ve gezegen bilim konularında zengin bir literatür bulunuyor. Sorun şu ki, kitap ne kadar uzun ya da ne kadar uzmanlaşmışsa, güncelliğini o kadar çabuk yitiriyor. Öte taraftan, web sitelerinin bazıları (hepsi değil!) sık sık güncelleniyor. Gezegenler hakkında daha çok şey keşfetmenize yardımcı olmak için, en iyi kitaplardan birkaçını ve çeşitli uygun internet giriş noktalarını önereceğim.

Genel

J. K. Beatty, C. C. Peterson ve A. Chaikin (yay. haz.), *The New Solar Sistem*, 4. baskı (Sky Publishing Corporation ve Cambridge University Press, 1999). Bu kitap her şeyi kapsıyor. Her bölüm bir uzman tarafından yazılmış. Bazı bölümlerinin güncelliği kaybolmuş, ama hâlâ kolayca ulaşılabilen bir klasik.

I. Gilmour ve M. A. Sephton (yay. haz.), *An Introduction to Astrobiology* (Cambridge University Press, 2003). 2007'de güncelleştirilmiş olan bu kitap, Open University'nin bir gezegen bilim dersine dayalı iki cildin ikincisidir ve lisans başlangıç düzeyinde yazılmıştır. Bu cilt yaşamı, olası yaşam alanları olarak Mars, Europa ve Titan'ı ve dış gezegenleri ele almaktadır. 2011'de yeniden basılması beklenmektedir.

N. McBride ve I. Gilmour (yay. haz.), *An Introduction to the Solar System* (Cambridge University Press, 2003). 2007'de güncelleştirilmiş olan bu kitap, Open University'nin bir gezegen bilim dersine dayalı iki cildin ilkidir ve lisans başlangıç düzeyinde yazılmıştır. Güneş Sistemi'nin Güneş hariç başlıca unsurlarının hepsini kapsamaktadır. 2011'de yeniden basılması beklenmektedir.

S. A. Stern (yay. haz.), *Our Worlds: The Magnetism and Thrill of Planetary Exploration* (Cambridge University Press, 1999). Kolay okunur, ama bilgilendirici bir kaynak. Her bölüm, önde gelen uygulamacılardan birinin kişisel anlatısından oluşmaktadır.

D. A. Weintraub, *Is Pluto a Planet?* (Princeton University Press, 2007). Buraya kadar yazılanları okuduysanız, bu kitabın başlığında sorulan sorunun yanıtını zaten biliyorsunuzdur. Ancak kitap bundan çok daha fazlasını içermektedir ve antik çağlardan NÖC'lerin sınıflandırılması konusundaki yakın tarihli dalaşlara dek, insanın gezegenlere dair algısının tarihsel bir anlatısıdır.

Yerbenzeri gezegenler

M. Hanlon, *The Real Mars* (Constable, 2004). Bir bilim yazarının Mars hakkındaki bakış açısı; basit yazılmış ve özenle resimlendirilmiştir.

J. S. Kargel, Mars: *A Warmer Wetter Planet* (Springer Praxis, 2004). Önde gelen bir bilim insanının Mars'taki gizli suyun rolü konusundaki kişisel görüşü.

R. M. C. Lopes ve T. K. P. Gregg (yay. haz.), *Volcanic Worlds: Exploring the Solar System's Volcanoes* (Springer Praxis, 2004). Uzmanlarca yazılmış bölümlerinde yerbenzeri geze-

genler, Ay, Io ve buzlu uydulardaki volkan faaliyetlerinin ele alındığı popüler bir anlatı.

R. G. Strom ve A. L. Sprague, *Exploring Mercury* (Springer Praxis, 2003). Benim bildiğim en iyi Merkür incelemesi, ama MESSENGER'ın gezegeni incelemeye başlamasından önce yazılmış.

Asteroitler

J. Bell ve J. Mitton (yay. haz.), *Asteroid Rendezvous: NEAR Shoemaker's Adventures at Eros* (Cambridge University Press, 2002). Yörüngeye girip, sonra bir asteroide çakılan ilk araştırma aracının bulgularına dair iyi resimlenmiş ve popüler bir anlatı.

Dev gezegenler

F. Bagenal, T. Dowling ve W. McKinnon (yay. haz.), *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere* (Cambridge University Press, 2004). Uzmanlarca yazılmış 26 bölüm içeren hacimli bir kitap. Sizi elinizdeki kitaptan çok daha ilerilere taşıyacak.

E. D. Miner ve R. R. Wessen, *Neptune: The Planet, Rings and Satellites* (Springer Praxis, 2002). Çok daha ince ve daha basit yazılmış bir kitap. Kötü yaşlanması olası görünmüyor.

Uydular

R. Greenberg, *Unmasking Europa* (Springer, 2007). Europa hakkında, Greenberg'in araştırma ekibinin ince buz yorumlarının kabul edilmesini sağlamak için yerleşik düzene karşı nasıl mücadele etmesi gerektiği konusunda bazı sert pasajlar da içeren, açık ve otoriter bir anlatı.

R. Lorenz ve J. Mitton, *Titan Unveiled* (Princeton University Press, 2008). Yazarlardan ilki Titan'ı inceleyen Cassini-Huygens ekibinin önemli üyelerinden biri olduğu için, içgörülü bir anlatı. Ancak Titan'ın göllerinin tam olarak fark edilmesinden önce yazılmış.

D. A. Rothery, *Satellites of the Outer Planets*, 2. baskı (Oxford University Press, 1999). Benim yazdığım bu kitap, Jüpiter'den Neptün'e büyük uydular hakkında, elinizdeki kitap sizi daha fazlasına meraklandırmışsa uygun olacak bir düzeyde yazılmış bir anlatıdır. Galileo bulgularından bazılarını içerir, ama Satürn'e giden *Cassini-Huygens* uçuşundan önce yazıldığından, bazı bölümleri güncelliğini yitirmiştir.

Dış gezegenler

H. Klahr ve W. Brander (yay. haz.), *Planet Formation* (Cambridge University Press, 2006). Bu listedekilerin çoğundan daha teknik olan bu kitap, 2004'te gerçekleştirilen bir konferansta sunulan bildirilere dayalıdır. Gezegen oluşumuna, Güneş Sistemimize ilişkin modern kuramların ve dış gezegen sistemleri keşiflerinin ışığında bakar.

F. Casoli ve T. Encrenaz, *The New Worlds: Extrasolar Planets* (Springer Praxis, 2007). Bulabildiğim en güncel popüler dış gezegenler anlatısı.

Web siteleri

Aşağıdaki web sitelerine 4 Temmuz 2010'da erişilmiştir.

Genel

www.nasa.gov

NASA'nın ana sayfası. Uçuşlar ya da bireysel olarak Güneş Sistemi cisimleri için buradaki bağlantılara tıklayınız.

Görüntüler

pds.jpl.nasa.gov/planets/

NASA'nın "Gezegenlere Hoş Geldiniz" sayfası; her gökcismine basit bir giriş ve küçük bir görüntü seçkisi içermektedir.

photojournal.jpl.nasa.gov/

Güneş Sistemi'ndeki gökcisimlerinin daha kapsamlı bir NASA görüntüleri arşivi.

http://www.esa.int/esa-mmg/mmghome.pl

Avrupa Uzay Ajansı'nın sunduğu multimedya galerisi.

http://isas.ac.jp/e/index/shtml

Japonya'nın Uzay ve Uzay Bilim Enstitüsü (ISAS). Japon uçuşlarından görüntü ve filmlere bağlantılar içermektedir.

arc.iki.rssi.ru/eng/index.htm

Rus Uzay Araştırmaları Enstitüsü (IKI). Rus (ve eski Sovyet) uçuşlarından görüntülere ve bilgilere ulaşmak için Planetary Exploration bağlantısını izleyin.

hubblesite.org/gallery/

Hubble Uzay Teleskobu'ndan görüntüler galerisi; gezegen adına göre arama yapılabilmektedir.

Haritalar ve adlandırmalar

http://www.mapaplanet.org

Gezegenlerin istediğiniz bölgeleri için kendi haritalarınızı yaratabileceğiniz bu site, ABD Jeolojik İncelemeler, Astroloji Araştırma Programı tarafından işletilmektedir.

planetarynames.wr.usgs.gov/

Gezegenler, uydular ve asteroitler için adlar atlası. Adlandırma gelenekleri konusunda bilmeniz gereken her şeyi ve her bir gökcismi için her türde yüzey özelliğinin güncel, arama yapılabilir ad listelerini içermektedir.

Haberler ve veriler

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary

Her bir gezegen ve öteki gökcismi sınıfları için verdiği bağlantılarla sizi veri dosyalarına ve çok daha fazlasına götürecektir.

http://www.minorplanetcenter.org/iau/mpc.html

IAU Küçük Gezegen Merkezi'nin (Smithsonian Astrofizik Gözlemevi) web sitesi. Dünyaya yakın gökcisimleri hakkında son derece iyi bilgiler sunmaktadır.

www.boulder.swri.edu/ekonews/

Kuiper kuşağı hakkında elektronik haber bülteni, ayrıca çeşitli yararlı linkler.

www.exoplanet.eu

Extrasolar Planet Encyclopedia. Şu andaki bilinen cisimler çetelesini izleyen, sık sık güncellenen bir katalog ve, ayrıca, çeşitli dış gezegen saptama yöntemleri hakkında dersler içerir.

http://www.planetary.org/home/

The Planetary Society. Gezegen keşiflerini teşvik amaçlı uluslararası (ABD merkezli) bir örgüt. İyi bir haber ve yorum kaynağı.

GEZEGENLER

DAVID A. ROTHERY

Türkçesi: SİNEM GÜL

BAŞKA DÜNYALARIN HEPİMİZİ BÜYÜLÜYOR OLDUĞU GERÇEĞİ İNKÂR EDİLEMEZ. GÜNEŞ SİSTEMİNİ OLUŞTURAN GEZEGENLERİ VE ONLARI ÇEPEÇEVRE SARAN YILDIZLARI KONU EDİNEN BU ÇALIŞMA SONSUZ BİR SIRLAR EVRENİNİN KAPISINI ARALIYOR ADETA. GEZEGENLER, GÖK CİSİMLERİ VE YILDIZLARIN HAREKETLERİ KONUSUNDA İNSANIN BESLEDİĞİ KADİM MERAK, YÜZYILLAR İÇİNDE BİLİMSEL GÖRÜMÜZÜN TEMEL BİLEŞENLERİNİ, ASGARİ KABULLERİNİ TÜMDEN DEĞİŞTİRECEK ÖLÇÜDE GELİŞTİ. GEZEGEN BİLİMİNİN SON YILLARDA ELDE ETTİĞİ BULGULAR, MARS'A KURULACAĞINDAN SÖZ EDİLEN KOLONİ, PLÜTON'U KULÜPTEN DIŞLAYAN NİHAİ VERİLER VE DAHA BİRÇOK GÜNCEL GELİŞME, MERKÜR'E GÖNDERİLECEK X-IŞINI SPEKTROMETRESİNİ GELİŞTİREN EKİBİN BAŞINDAKİ ROTHERY'NİN KALEMİNDEN ŞİMDİ TÜRKÇE'DE.

Kültür Kitaplığı: 168; Bilim: 12





D